

VINÍCIUS PONS

ESTUDO DO POTENCIAL DOS MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE PARA  
REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA MANUTENÇÃO DO CONFORTO  
TÉRMICO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

CURITIBA

2017

VINÍCIUS PONS

ESTUDO DO POTENCIAL DOS MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE PARA  
REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA MANUTENÇÃO DO CONFORTO  
TÉRMICO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, na área de concentração em Ambiente Construído, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. George Stanescu.

CURITIBA

2017

---

P798e

Pons, Vinícius

Estudo do potencial dos materiais com mudança de fase para redução do consumo de energia na manutenção do conforto térmico no ambiente construído / Vinícius Pons. – Curitiba, 2017.  
112 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2017.

Orientador: George Stanescu.

1. Energia térmica. 2. Conforto térmico. 3. Construção civil.  
I. Universidade Federal do Paraná. II. Stanescu, George. III. Título.

CDD: 621.47

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

VINÍCIUS PONS

### ESTUDO DO POTENCIAL DOS MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA MANUTENÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Área de Concentração: Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:  \_\_\_\_\_

Prof. Dr. George Stanescu

Departamento de Engenharia Mecânica – UFPR

Examinador:  \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ing. Aloísio Leoni Schmid

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil – UFPR

Examinador:  \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Nathan Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica da PUCPR

Curitiba, 19 de abril de 2017.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de aprofundar os estudos, juntamente com toda a estrutura necessária para tal.

Aos professores do programa de pós-graduação – PPGECC que sempre estiveram disponíveis, auxiliando no pensamento científico e crítico necessário para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado nas horas de trabalho e descanso, sempre dispostos a ajudar e a acalmar nas horas de tormentas.

Ao meu orientador professor George Stanescu com seu pensamento sempre crítico e disposto a sempre ajudar da melhor maneira possível.

Aos meus pais pela minha educação contínua e pelo apoio nas horas difíceis.

À Danuza pela insistência, mas principalmente pela paciência durante esses dois anos.

A todos que aqui não cito, mas que me ajudaram a ter forças para concluir este trabalho.

## RESUMO

Este trabalho trata da busca por novas soluções para a construção civil com foco na redução do consumo energético para manutenção do conforto térmico no ambiente construído. O potencial de redução do consumo de energia elétrica para manter o conforto térmico no ambiente construído foi avaliado para as oito zonas bioclimáticas definidas de acordo com a norma brasileira NBR 15.220, ao empregar na parede externa de uma determinada construção uma camada de material de mudança de fase (PCM) de origem orgânica natural. O modelo físico considerado neste estudo é representado por uma sala comercial com área de 40 m<sup>2</sup>, com uma única parede voltada para o exterior enquanto todas as outras paredes, forro e piso são internos ao edifício. As simulações numéricas foram realizadas considerando a camada de PCM instalada no meio da parede externa (norte). Para avaliar o mínimo de consumo de energia elétrica teoricamente possível foram consideradas três estratégias para o controle e a manutenção do conforto térmico: (1) pela utilização de uma única bomba de calor funcionando conforme um ciclo de Carnot invertido cujo coeficiente de desempenho (COP) é considerado uma constante, (2) pela utilização da bomba de calor acima mencionada, mas priorizando sempre a ventilação com ar externo quando a diferença de temperatura for favorável e (3) priorizando a ventilação com ar externo quando a diferença de temperatura for favorável e quando for necessário empregar várias bombas de calor funcionando conforme ciclos de Carnot invertidos cujos COPs são calculados conforme a temperatura instantânea interna e externa. A espessura da camada PCM foi determinada para cada zona bioclimática por tentativa e erro de modo que haja PCM suficiente para produzir a qualquer momento no máximo líquido saturado durante a mudança de fase pela acumulação de energia térmica, enquanto o sub-resfriamento da fase sólida do PCM foi permitido. Neste trabalho o controle do conforto térmico foi realizado somente para a manutenção na faixa 18°C - 24°C da temperatura interna na sala comercial mencionada, assumindo o uso como PCM de uma mistura de ácido cáprico e álcool dodecílico com entalpia de fusão igual a 126,9 kJ/kg e temperatura de fusão de 26,5°C. Com base na estratégia 1, isso teoricamente permitiria uma redução de 4,28% no consumo de energia da referida sala comercial, supostamente construída na cidade de Santa Maria no Rio Grande do Sul, ao mesmo tempo em que priorizando a ventilação com ar externo (estratégia 2) uma redução de 13,33% no consumo total de energia pode ocorrer de acordo com os resultados numéricos obtidos neste estudo. Outra cidade onde os resultados numéricos sugerem melhorias com o uso de PCM é a cidade de Curitiba, onde teoricamente seria possível reduzir 9,47% do consumo de eletricidade ao utilizar a estratégia 2. Cálculos realizados com base na estratégia 3 para a mesma cidade indicam que o uso de PCM pode levar a uma redução de 20,18% no consumo de energia elétrica na manutenção da temperatura interna na faixa de conforto definida. Para as oito zonas bioclimáticas, os resultados numéricos obtidos com base na estratégia 3, que requer os maiores avanços tecnológicos para torná-la viável, indicam reduções significativas (mais de 90%) do consumo de energia em relação à situação sem o uso de PCM. Uma análise de exergia também foi desenvolvida. A exergia da radiação solar representa entre 60% e 90% da exergia total recebida pelo edifício durante a sua utilização em condições de conforto térmico adequado.

Palavras-chave: eficiência energética; conforto térmico; ambiente construído; materiais com mudança de fase.

## ABSTRACT

*This study focuses on new solutions for the civil engineering to diminish the energy consumption to maintain the thermal comfort in the built environment. The potential of reducing electrical energy consumption to maintain thermal comfort in the built environment was evaluated for the eight bioclimatic zones defined according to the Brazilian standard NBR 15.220, when employing into the external wall of a given construction a layer of phase change material (PCM) of natural organic origin. The physical model considered in this study is represented by a commercial room with an area of 40 m<sup>2</sup>, with a single wall facing the exterior while all other walls, ceiling and floor are internal to the building. The numerical simulations were performed considering the PCM layer installed in the middle of the external wall (north). In order to evaluate the minimum energy consumption theoretically possible, three strategies were considered for the control and maintenance of thermal comfort: (1) the use of a single heat pump running according to an inverted Carnot cycle whose coefficient of performance (COP) is considered constant, (2) by the use of the above-mentioned heat pump, but always prioritizing the ventilation with external air when the temperature difference is favorable and (3) prioritizing the ventilation with external air when the temperature difference is favorable and, when necessary, by employing several heat pumps operating according to inverted Carnot cycles whose COPs are calculated according to the internal and external instantaneous temperatures. Thickness of the PCM layer was determined for each bioclimatic zone by trial and error such that there is enough PCM to produce anytime at maximum saturated liquid during the phase change by thermal energy accumulation, while the sub-cooling of the PCM solid phase was allowed. In this work the thermal comfort control was performed only for the maintenance in the range of 18°C - 24°C of the internal temperature in the mentioned commercial room, assuming the use as PCM of a mixture of capric acid and dodecyl alcohol with fusion enthalpy equal to 126.9 kJ / kg and melting temperature of 26.5°C. Based on strategy 1, this would theoretically allow a reduction of 4.28% in the energy consumption of the aforementioned commercial room supposedly built in the city of Santa Maria in Rio Grande do Sul, while when prioritizing the ventilation with external air (strategy 2) a reduction of the energy consumption of 13.33% could occur according to the numerical results obtained in this study. Another city where the numerical results suggest improvements with the use of PCM is the city of Curitiba, where theoretically it would be possible to reduce 9.47% of the electricity consumption when using strategy 2. Calculations performed based on the strategy 3 for the same city indicate that the use of PCM could lead to a reduction of 20.18% in electric energy consumption for maintaining the internal temperature in the defined comfort range. An exergy analysis was also developed. The exergy of solar radiation represents between 60% and 90% of the total exergy received by the building during its use in conditions of adequate thermal comfort.*

**Keywords:** energy efficiency; thermal comfort; build environment; phase change materials.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte. ....	17
FIGURA 2 – Consumo energético por setor.....	17
FIGURA 3 – Distribuição do consumo residencial.....	18
FIGURA 4 – Distribuição do consumo comercial. ....	18
FIGURA 5 – PCM Microencapsulado.....	23
FIGURA 6 – PCM Macroencapsulado.....	24
FIGURA 7 – Processo de transição entre fases.....	25
FIGURA 8 – Macroencapsulamento PCM.....	28
FIGURA 9 – Gráfico de interação fluxo calor e temperatura. ....	30
FIGURA 10 - Carga Térmica de Condicionamento de Ar.....	31
FIGURA 11 – Comparativo da fração de líquido. ....	32
FIGURA 12 – Comparativo paredes com e sem PCM. ....	35
FIGURA 13 – Carta Psicrométrica para Curitiba, Brasil, com a faixa de conforto utilizada. ....	42
FIGURA 14 – Planta modelo físico.....	44
FIGURA 15 – Corte A – Modelo Físico .....	45
FIGURA 16 – Corte B – Modelo Físico .....	45
FIGURA 17 – Foto escritório exemplo.....	46
FIGURA 18 – Corte Parede Sul, Leste e Oeste .....	48
FIGURA 19 – Corte Forro.....	49
FIGURA 20 – Corte Piso .....	49
FIGURA 21 – Corte parede referência norte.....	49
FIGURA 22 – Corte parede com PCM .....	51
FIGURA 23 – Resumo interações do modelo físico. ....	54
FIGURA 24 – Esquema de transmissão de energia através da parede norte – caso referência. ....	60
FIGURA 25 - Esquema de transmissão de energia através da parede norte – caso com PCM.....	60
FIGURA 26 – Fluxograma controle interno de temperatura. ....	63
FIGURA 27 – Estratégia de cálculo do consumo energético para manutenção do conforto térmico no volume de controle - I .....	65



FIGURA 28 - Estratégia de cálculo do consumo energético para manutenção do conforto no volume de controle - II.....	66
FIGURA 29 - Estratégia de cálculo do consumo energético para manutenção do conforto no volume de controle - III.....	67
FIGURA 30 – Modelo de referência simulação EnergyPlus.....	68
FIGURA 31 – Descrição paredes, forro e piso modelo EnergyPlus. ....	68
FIGURA 32 – Propriedades físicas dos materiais utilizados no EnergyPlus. ....	69
FIGURA 33 – Comparativo 300 horas entre temperaturas simuladas com algoritmo desenvolvido (Fortran) e o software EnergyPlus 8.3.....	69
FIGURA 34 – Distribuição de diferenças.....	70
FIGURA 35 – Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Curitiba no mês de fevereiro.....	73
FIGURA 36 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Curitiba no mês de julho. ....	73
FIGURA 37 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Curitiba no ano inteiro.....	74
FIGURA 38 – Manutenção da temperatura interna dentro da faixa de conforto determinada. ....	75
FIGURA 39 – Gráfico da temperatura hora a hora da camada PCM. ....	75
FIGURA 40 – Carga térmica de aquecimento hora a hora para Curitiba. ....	76
FIGURA 41 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Curitiba.....	76
FIGURA 42 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Santa Maria no mês de fevereiro.....	80
FIGURA 43 - Comparativo hora a hora das temperaturas interna e externas, com e sem material com mudança de fase para Santa Maria no mês de julho. ....	81
FIGURA 44 - Carga térmica de aquecimento hora a hora para Santa Maria. ....	82
FIGURA 45 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Santa Maria.....	82
FIGURA 46 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para São Paulo no mês de fevereiro. ....	85
FIGURA 47 - Comparativo hora a hora das temperaturas interna e externas, com e sem material com mudança de fase para São Paulo no mês de julho.....	85
FIGURA 48 - Carga térmica de aquecimento hora a hora para São Paulo.....	86
FIGURA 49 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para São Paulo. ....	86

FIGURA 50 – Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Brasília no mês de fevereiro. ....	89
FIGURA 51 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Brasília no mês de julho. ....	89
FIGURA 52 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Brasília. ....	90
FIGURA 53 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Vitória da Conquista no mês de fevereiro. ....	92
FIGURA 54 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Vitória da Conquista no mês de julho. ....	93
FIGURA 55 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Vitória da Conquista. ....	93
FIGURA 56 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Campo Grande no mês de fevereiro.....	96
FIGURA 57 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Campo Grande no mês de julho.....	96
FIGURA 58 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Vitória da Conquista. ....	97
FIGURA 59 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Cuiabá no mês de fevereiro.....	99
FIGURA 60 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Rio de Janeiro no mês de fevereiro. ....	100
FIGURA 61 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Rio de Janeiro no mês de julho. ....	101
FIGURA 62 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Rio de Janeiro.....	101

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Vantagens e Desvantagens do uso de PCM .....	22
QUADRO 2 – Descrição geração energia interna .....	46
QUADRO 3 – Feriados Nacionais .....	47
QUADRO 4 – Propriedades dos Materiais .....	50
QUADRO 5 – Propriedades do material com mudança de fase.....	51
QUADRO 6 – Definição cidades por zona bioclimática .....	52
QUADRO 7 – Arquivos de dados climáticos .....	53

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Materiais disponíveis no mercado. ....	24
TABELA 2 – Materiais translúcidos no mercado. ....	26
TABELA 3 – Resumo do consumo dos cenários simulados para Curitiba. ....	77
TABELA 4 – Frações de Exergia para Curitiba - Paraná .....	79
TABELA 5 - Resumo consumo dos cenários simulados para Santa Maria.....	83
TABELA 6 - Frações de Exergia para Santa Maria – Rio Grande do Sul.....	84
TABELA 7 - Resumo consumo energético dos cenários simulados para São Paulo. .....	87
TABELA 8 - Frações de Exergia para São Paulo.....	88
TABELA 9 – Resumo do consumo energético dos cenários simulados para Brasília. .....	90
TABELA 10 - Frações de Exergia para Brasília .....	92
TABELA 11 - Resumo do consumo energético dos cenários simulados para Vitória da Conquista. ....	94
TABELA 12 – Frações de exergia para Vitória da Conquista.....	95
TABELA 13 - Resumo do consumo energético dos cenários simulados para Campo Grande. ....	97
TABELA 14 – Frações de Exergia para Campo Grande. ....	98
TABELA 15 - Resumo do consumo energético dos cenários simulados para o Rio de Janeiro. ....	102
TABELA 16 – Frações de exergia para o Rio de Janeiro.....	103

## LISTA DE GRAFICOS

GRÁFICO 1 – Gráfico hora a hora durante o período de cinco dias para a cidade de Curitiba – PR. ....	71
GRÁFICO 2 – Comparativo dos casos simulados para Curitiba – Paraná.....	78
GRÁFICO 3 – Comparativo dos casos simulados para Santa Maria – Rio Grande do Sul. ....	84
GRÁFICO 4 - Comparativo dos casos simulados para São Paulo – São Paulo. ....	88
GRÁFICO 5 - Comparativo dos casos simulados para Brasília – DF.....	91
GRÁFICO 6 - Comparativo dos casos simulados para Vitória da Conquista – BA. ..	94
GRÁFICO 7 - Comparativo dos casos simulados para Campo Grande.....	98
GRÁFICO 8 - Comparativo dos casos simulados para Cuiabá.....	100
GRÁFICO 9 - Comparativo dos casos simulados para o Rio de Janeiro. ....	103
GRÁFICO 10 – Comparativo de reduções de consumo de energia elétrica para cada cidade simulada, com método de cálculo segundo o cenário 1. ....	104
GRÁFICO 11 - Comparativo de reduções de consumo de energia elétrica para cada cidade simulada, com método de cálculo segundo o cenário 2. ....	104
GRÁFICO 12 - Comparativo de reduções de consumo de energia elétrica para cada cidade simulada, com método de cálculo segundo o cenário 3. ....	105
GRÁFICO 13 - Comparativo de reduções de consumo de energia elétrica potencial máximo para todas as cidades simuladas.....	106

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO .....	15
1.2	HIPÓTESE .....	15
1.3	OBJETIVO .....	16
1.4	JUSTIFICATIVA.....	16
1.4.1	Justificativa Tecnológica.....	19
1.5	CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA .....	19
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1	MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE.....	21
2.2	APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS.....	26
2.3	ESTADO DA ARTE .....	29
<b>3.</b>	<b>METODO .....</b>	<b>38</b>
3.1	UNIDADE DE ANÁLISE .....	38
3.2	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	38
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	38
3.4	TESTES DE VALIDADE .....	39
3.4.1	Validade do constructo .....	39
3.4.2	Validade interna.....	39
3.4.3	Validade externa.....	39
3.5	Confiabilidade .....	40
3.6	PROTOCOLO DE COLETA E METODO DE ANALISE DE DADOS.....	40
<b>4.</b>	<b>DEFINIÇÕES DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>42</b>
4.1	MODELO FISICO .....	43
4.2	GERAÇÃO INTERNA DE CALOR.....	46
4.3	VENTILAÇÃO.....	47
4.4	MATERIAIS E PROPRIEDADES DE REFERÊNCIA.....	48
4.5	PCM.....	50
4.6	CASOS SIMULADOS .....	51
4.7	DADOS CLIMÁTICOS .....	53
<b>5.</b>	<b>ALGORITMO .....</b>	<b>54</b>
5.1	MODELO MATEMÁTICO .....	54
5.2	EQUAÇÕES .....	55

<b>6.</b>	<b>VALIDAÇÃO .....</b>	<b>68</b>
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
7.1	CURITIBA (ZONA BIOCLIMÁTICA 1) .....	72
7.2	SANTA MARIA (ZONA BIOCLIMÁTICA 2) .....	80
7.3	SÃO PAULO (ZONA BIOCLIMÁTICA 3) .....	85
7.4	BRASILIA (ZONA BIOCLIMÁTICA 4) .....	88
7.5	VITÓRIA DA CONQUISTA (ZONA BIOCLIMÁTICA 5).....	92
7.6	CAMPO GRANDE (ZONA BIOCLIMÁTICA 6).....	95
7.7	CUIABÁ (ZONA BIOCLIMÁTICA 7).....	99
7.8	RIO DE JANEIRO (ZONA BIOCLIMÁTICA 8) .....	100
7.9	RESUMO DOS RESULTADOS .....	103
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>107</b>
8.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Energia, esta palavra, define o centro do objetivo desta pesquisa. Energia elétrica e energia térmica são essenciais para a atual vida dos seres humanos na Terra, sem as quais diversas das atividades de trabalho se tornariam inviáveis e alguns locais do globo se tornariam inóspitos. Porém, mesmo que tão maravilhosas as possibilidades criadas por quantidades imensas de energia gerada e consumida todos os dias, a energia será infinita? Quais os malefícios de uma produção de alto impacto ao meio ambiente e os próprios seres humanos? A redução do consumo de energia, seja ela de qual forma ou fonte, é uma busca atual da sociedade.

Mais de 70% da produção energética brasileira tem origem em fontes renováveis, sendo 50,2% do total do consumo de energia brasileiro utilizado para abastecer edificações e a manutenção da faixa de conforto térmica sendo uma das grandes vilãs.

A busca pelo avanço tecnológico gerou não apenas pesquisas, mas uma aparente busca incessante da população por dispositivos eletrônicos. No caso da construção civil, apresenta-se o caso em que a arquitetura como solução otimizada de edificações é deixada de lado, pois tudo pode ser resolvido com a tecnologia, com ar-condicionado, umidificadores e lâmpadas em grandes quantidades.

Pesquisas vêm desenvolvendo produtos que consumam cada vez menos energia para a construção civil, as lâmpadas de LED são um exemplo. Equipamentos inteligentes que gerenciam e otimizam o consumo de energia também são modelos de soluções. Os materiais instalados nas camadas da envoltória são opções de agentes passivos de controle térmico da edificação, ou seja, permitem que a construção sozinha tenha melhor resposta ao clima externo quanto à necessidade de energia para manutenção do conforto térmico interno. Desde a década de 80, porém com mais intensidade nos últimos 8 anos, estudam-se os materiais chamados *Phase Change Materials* (PCM, materiais com mudança de fase). PCMs são materiais que realizam mudança de fase com um grande consumo de energia. Por isto, quando utilizados em edificações aumentam a inércia térmica das mesmas, fator favorável em relação à redução do consumo de energia para manutenção do conforto térmico em determinadas localidades. O potencial de redução de consumo de energia elétrica com a utilização de materiais com mudança de fase na envoltória de edificações é o foco deste trabalho. Utilizando materiais de fontes renováveis, os chamados *Bio-*

*based* PCMs, a pesquisa busca analisar, para 8 cidades brasileiras, se há um potencial de redução do consumo, onde a utilização de PCMs é mais recomendada e qual a escala desta redução. A utilização da ventilação como parte da estratégia de redução do consumo também é levada em consideração neste trabalho.

Esta pesquisa não tem como objetivo somente quantificar a redução do consumo de energia, mas apresentar novos materiais e ideias para desenvolvimento de sistemas inteligentes para área de construção civil e todo o mercado em geral.

## 1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

A busca atual por melhor desempenho térmico e energético nas construções tem influenciado o desenvolvimento de produtos para a construção civil que permitam menores consumos de energia. Um dos possíveis materiais a serem utilizados são os PCMs. Esses materiais podem armazenar energia térmica durante as mudanças de fase (de sólido para líquido) constituindo dessa forma verdadeiras barreiras térmicas que, em determinadas condições climáticas, podem melhorar o desempenho energético de ambientes construídos.

Qual o potencial, sob a ótica da redução do consumo de energia, da utilização de PCMs como camada da vedação externa de edificações, como alternativa às técnicas construtivas comumente utilizadas no Brasil (argamassa, alvenaria, argamassa)?

## 1.2 HIPÓTESE

PCMs, como camadas de paredes externas de edificações, vêm sendo testados em diversas pesquisas como materiais que possibilitam a redução da amplitude térmica no interior de edificações, o que significa menores picos de temperatura, sejam eles mínimos ou máximos. Cabeza et al. (2007) utilizaram o produto Micronal PCM (BASF) com ponto de fusão a 26°C e entalpia de mudança de fase de 110kJ/kg misturados em uma placa de concreto de 0,12cm de espessura. A pesquisa estudou experimentalmente o efeito da instalação dessas placas em um cubículo construído para o estudo. Os resultados, para os meses de primavera e verão, mostraram uma redução efetiva da amplitude térmica interna. Halford e Boehm (2007) estudaram numericamente através da utilização do software MATLAB a influência da utilização de vedações do tipo “Isolante+PCM+Isolante” nos meses de



primavera e verão. O PCM utilizado entre as camadas de material isolante é do tipo inorgânico, sal hidratado. A pesquisa apresentou que a mudança de fase do material influencia na transmissão de calor da camada externa para a camada interna da parede e gera uma redução de até 25% se comparado ao mesmo material sem a troca da fase.

O uso de PCMs, como se percebe, por exemplo, pela pesquisa de Soares et al. (2014), tem sido testado em condições variadas de aplicação em elementos construtivos e em diferentes localidades. A sua utilização reduz em, no mínimo, 15% a carga de aquecimento ou resfriamento necessária para o controle do conforto térmico (intervalo entre 20 e 25°C durante o horário comercial e 15 e 25°C no restante do dia) interno de edificações na totalidade anual de consumo.

Portanto, apresenta-se como uma alternativa viável de redução do consumo energético em edificações, a ser estudada para as construções brasileiras de diferentes regiões, devido as suas propriedades térmicas e diferentes efeitos encontrados na bibliografia.

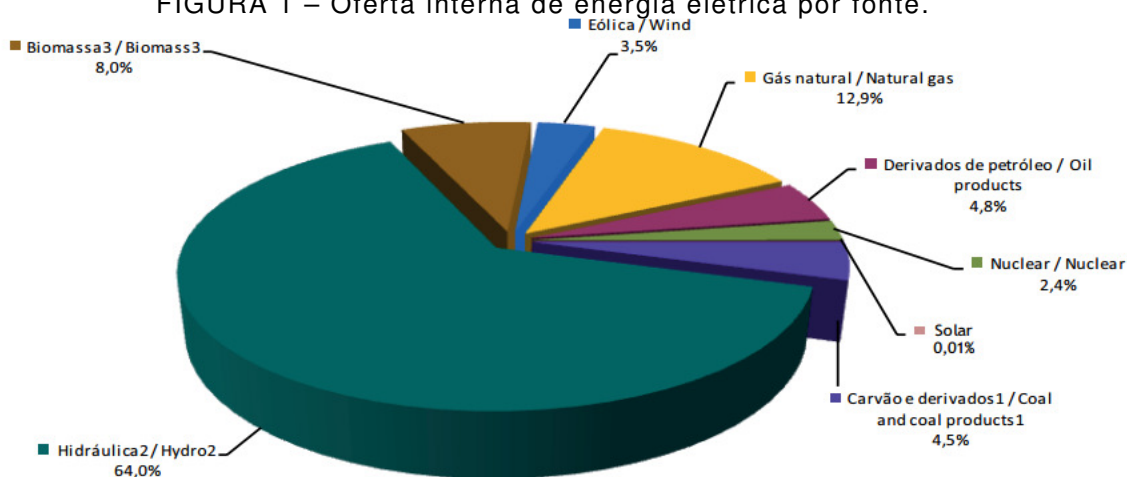
### 1.3 OBJETIVO

Com base nos dados climáticos das oito zonas bioclimáticas definidas de acordo com a norma brasileira NBR 15.220, esta pesquisa tem como objetivo quantificar o potencial de redução do consumo de energia para manter o conforto térmico em ambientes construídos utilizando compostos PCM nas paredes externas.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

Com o atual cenário energético mundial, o potencial de oferta de energia para os próximos anos tende a diminuir e diversas razões podem ser atribuídas a esse fato. Uma delas é a redução da matéria prima para a produção de energia. No Brasil, as fontes energéticas renováveis, excluindo-se as hidroelétricas, somam apenas 11,51% de toda oferta interna de energia (FIGURA 1). De outro lado o consumo de energia elétrica para edificações (considerando setores residenciais, comerciais e públicos) representa 50,2% do total brasileiro, sendo que 25,1% são consumidos apenas pelo setor residencial (BRASIL, 2016).

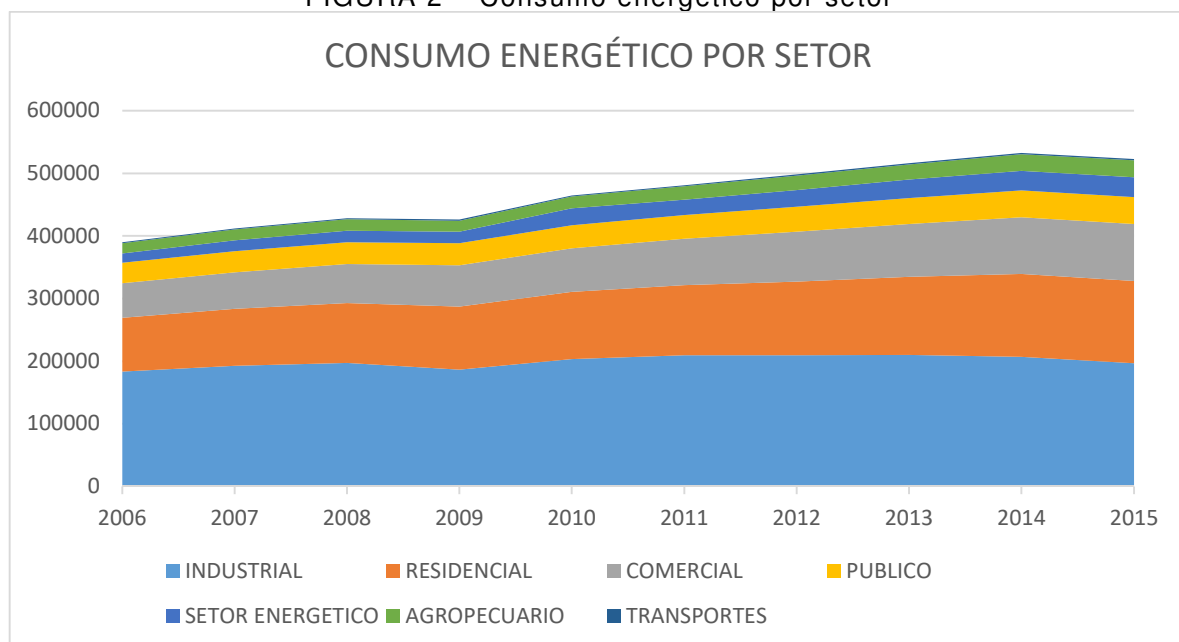
FIGURA 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte.



Fonte: (BRASIL, 2016)

Também é notável pelo balanço energético nacional o aumento do consumo de energia por todos os setores, representado pelo gráfico da FIGURA 2. O consumo para o setor comercial cresceu aproximadamente 65% em 10 anos.

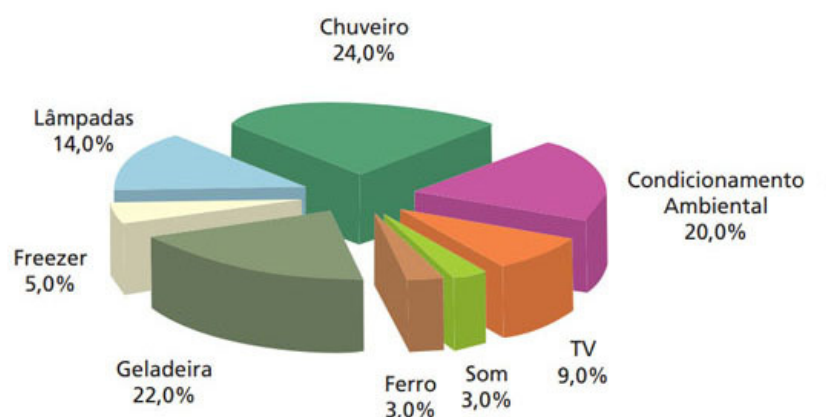
FIGURA 2 – Consumo energético por setor



Fonte: Adaptado pelo autor de BRASIL (2016).

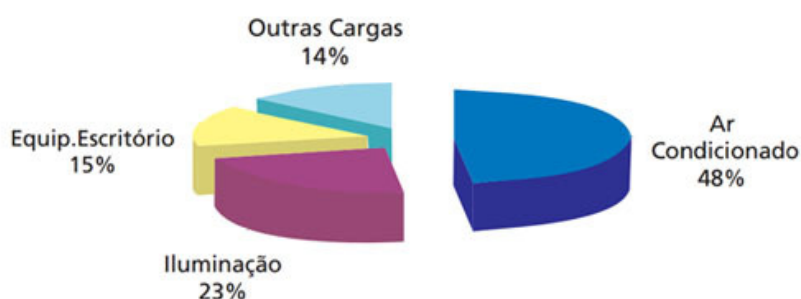
Estudo da Eletrobras/Procel (2009) levantou dados do consumo energético residencial, comercial e industrial no Brasil. O uso de condicionamento de ar para residências (FIGURA 3) chega a 20% do total da energia elétrica consumida. Para o uso comercial (FIGURA 4) esse número chega a 48%, sendo ar-condicionado o maior consumidor no ramo comercial.

FIGURA 3 – Distribuição do consumo residencial.



Fonte: (ELETROBRAS/PROCEL, 2009)

FIGURA 4 – Distribuição do consumo comercial.



Fonte: (ELETROBRAS/PROCEL, 2009)

O consumo energético para residências varia de acordo com o aumento da população, redução do número de pessoas por domicílio e o aumento do poder aquisitivo, o que incentiva o consumo extra. Segundo dados do Plano Nacional Energético para 2050 (EPE, 2016), atualmente, são consumidos 124TWh de energia elétrica por 63 milhões de domicílios no Brasil. Para 2050, estima-se que 98 milhões de residências cheguem a consumir 336TWh. Tal parcela representa hoje 44% do consumo total elétrico, passando a 67% em 2050.

Segundo Pereira et al. (2013) o Brasil encontra-se na quinta colocação do ranking dos países, onde mais se compram equipamentos de ar-condicionado do mundo.

Apesar das edificações serem grandes vilãs no consumo de energia durante suas vidas úteis, existe uma grande margem para redução deste. Projetos e construções de edificações menos dependentes de energia são partes importantes desse processo de redução do consumo (UNEP, 2011).

Bodach e Hamhaber (2010) apresentam um trabalho de análise do consumo energético de uma edificação na cidade do Rio de Janeiro. Os autores evidenciaram

a importância de um estudo mais cuidadoso do impacto do projeto sobre o conforto térmico do ambiente construído. Através de considerações pontuais e economicamente viáveis no projeto é possível reduzir o consumo de energia elétrica.

O paisagismo, a orientação solar, a tipologia da edificação e dispositivos de sombreamento são elementos que podem contribuir para um melhor aproveitamento da energia solar (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

#### 1.4.1 JUSTIFICATIVA TECNOLÓGICA

Assim como no caso de Bodach e Hamhaber, um dos elementos cruciais para o controle térmico do ambiente construído é a escolha de vedações externas coerentes com a realidade do clima em que o projeto será implantado. Tais vedações são sugeridas com eficiência mínima sob a norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2003). Produtos como o PCM que possam melhorar a eficiência das paredes externas, podem ser muito importantes para a melhoria da qualidade de vida dentro da edificação e para a redução do consumo de energia.

“Incorporar o uso de materiais com mudança de fase (PCM) em uma edificação permite o uso mais dinâmico da energia. Devido a sua capacidade de armazenamento, o calor em excesso pode ser armazenado durante períodos quentes e liberado em períodos frios.” (KALNÆS; JELLE, 2015, tradução nossa)

A utilização de materiais como o PCM pode ajudar a reduzir a variação térmica interna, vindo de encontro à necessidade de um maior controle térmico do ar interno da construção. Tal controle permite que as horas de desconforto, período em que a temperatura e umidade fogem de uma faixa ideal determinada, dentro da edificação sejam reduzidas e, por consequência, a necessidade da utilização de ar condicionado também seja.

Para compreender tal efeito, é necessária uma simulação do impacto de sua incorporação à construção. Podendo-se estimar então o efeito do material proposto na edificação.

#### 1.5 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA

Este trabalho encontra-se na linha de pesquisa de Sustentabilidade no ambiente construído, na área de concentração de Ambiente Construído e Gestão do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da

Universidade Federal do Paraná. Orientado pelo professor Doutor George Stanescu do departamento de Engenharia Mecânica da mesma universidade. Este projeto segue a linha de pesquisa do orientado (eficiência energética no ambiente construído) e está se somando a outras dissertações desenvolvidas no PPGECC sobre o desempenho térmico e energético dos edifícios. Exemplos de trabalhos já realizados no programa de mestrado são: o estudo do Mazzarotto (2011) sobre uso de fachadas duplas ventiladas na cidade de Curitiba, a análise do tempo de retorno na utilização de lã de rocha em edificações situadas na cidade de Curitiba (Habib, 2014) e o trabalho desenvolvido pelo Alves (2014) com relação a utilização de dutos subterrâneos para controle térmico em todas as zonas bioclimáticas definidas pela norma brasileira. Apesar das pesquisas não trabalharem com o mesmo material, também estudam alternativas de redução do consumo de energia considerando uma faixa de temperatura de conforto. O estudo de Alves (2014) também apresenta uma análise para as oito zonas bioclimáticas presentes na NBR 15.220 (ABNT, 2003).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Da necessidade de um maior cuidado com a eficiência térmica das construções, novas tecnologias e aplicações são testadas na construção civil. Apresenta-se aqui um levantamento de pesquisas a respeito da situação energética brasileira, de materiais com mudança de fase, sua classificação e propriedades, estudos experimentais aplicados com enfoque na construção civil e o estado da arte de análise de desempenho térmico com a utilização de PCM no ambiente construído.

### 2.1 MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE

Os materiais chamados “Phase Change Materials” (PCM) vêm sendo estudados desde a década de 80 no meio acadêmico, com um aumento do número de pesquisas entre os anos 2000 e 2005, e uma grande expansão da área na última década. Quase 80% das pesquisas foram realizadas nos últimos 8 anos (DAVID; JOHANNES; ROUX, 2011).

Abhat (1983) classificou os PCMs em três grandes grupos baseados em sua composição química, orgânicos (parafinas ou ácidos graxos), inorgânicos (sais hidratados) e eutéticos, materiais com compostos orgânicos e inorgânicos ao mesmo tempo. O QUADRO 1 apresenta vantagens e desvantagens de cada tipo de PCM segundo a classificação anteriormente explicitada. O quadro citado, adaptado de Ali (2014), apresenta algumas vantagens e desvantagens de cada um dos grupos definidos por Abhat (1983). O valor de condutividade térmica auxilia na transmissão de calor para dentro e fora do material com mudança de fase, sendo assim os sais hidratados (PCM inorgânicos) apresentam opções de materiais que possuem maiores condutividades térmicas. O aumento de volume do material durante a troca de fase deve ser preferencialmente ser o menor possível de maneira a não afetar a encapsulação ou material utilizado como base. De maneira ideal, o PCM deve sofrer a liquefação total do material durante a fase de transição para que as fases sólidas e líquidas sejam homogêneas (sem segregação de fase). Também é importante definir o efeito “*supercooling*”: trata-se da característica de alguns compostos de sofrer a redução da temperatura abaixo da temperatura de solidificação ( $T_{solidificacao}$ ) para, apenas então, aumentar novamente a temperatura para  $T_{solidificacao}$  e iniciar o processo de solidificação.

QUADRO 1 – Vantagens e Desvantagens do uso de PCM

PCM ORGÂNICO (Parafinas e ácidos graxos)	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
Disponível em grande variedade de faixa de temperatura de fusão	Baixo valor de condutividade térmica (aprox. 0,2W/m.K)
Quimicamente inerte	Moderadamente inflamável
Maior número de ciclos sem perda de desempenho	Não compatível com compartimentos plásticos
Baixa pressão de vapor	
Não sofre segregação de fase	
Maior calor específico que sais hidratados	
Não corrosivo	
Compatível com materiais de construção	
Pouco aumento de volume durante transição de fase	
Não sofre o efeito “super cooling”	
Estáveis sob 500°C	
Recicláveis	
PCM INORGÂNICO (Sais Hidratados)	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
Alta capacidade de armazenamento de calor latente	Sofre efeito “super cooling” durante solidificação
Alto calor latente de fusão	Sofre segregação de fase durante a transição
Alta condutividade térmica (0,5W/m.K)	Corrosivo a maioria dos metais
Menor valor de mercado	Alto valor de pressão
Não inflamável	No longo prazo pode apresentar degradação por oxidação, hidrólises e outras reações
Compatível com compartimentos plásticos	Demonstra estabilidade química variável
Transição de fase mais definida	Grande variação de volume
Baixo impacto ambiental	
Potencial de reciclagem menor que de orgânicos	
EUTÉTICOS	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
Temperatura de transição de fase com pequena margem de variação	Poucos dados de testes já realizados
Alta densidade volumétrica de armazenamento térmico	

Fonte: Adaptado de Ali (2014)

A utilização na construção civil de PCMs pode ocorrer através de técnicas diferentes: a) Saturação de materiais: Pode ocorrer de diversos métodos; trata-se da adição do composto PCM ao material do qual se deseja ter as características térmicas alteradas. Problemas com vazamento do composto e deterioração das propriedades mecânicas do material original foram encontrados em pesquisas passadas; b) Microencapsulamento: Consiste no armazenamento do composto PCM em uma cápsula de polímero microscópica. A escolha do material da cápsula deve ser feita de tal maneira que não reaja com o composto PCM e com o material com a qual será misturada (FIGURA 5); c) PCM com formato estabelecido: Consiste na mistura líquida do composto PCM com um material de suporte e seu resfriamento até o ponto de solidificação. No ponto de vista macroscópico temos um material homogêneo, porém microscopicamente é possível ver as variações dos dois materiais utilizados (DAVID; JOHANNES; ROUX, 2011); d) Macroencapsulamento (FIGURA 6): É o mesmo conceito do microencapsulamento, porém agora são utilizados recipientes de armazenamento maiores, como tubos, esferas e outros. Esses recipientes podem ser utilizados como trocadores de calor ou incorporados a outros produtos da construção. A utilização de macroencapsulamento apresenta uma menor eficiência térmica, se comparado ao microencapsulamento, devido aos problemas de solidificação junto a superfície externa, fazendo com que a troca de calor seja dificultada. Tal efeito é quase imperceptível no microencapsulamento devido a sua escala reduzida (PASUPATHY; VELRAJ; SEENIRAJ, 2008).

FIGURA 5 – PCM Microencapsulado



Fonte: (BASF, 2016)



FIGURA 6 – PCM Macroencapsulado.



Fonte: (PHASE CHANGE ENERGY SOLUTIONS, 2016)

Diversos tipos de compostos PCM já se encontram disponíveis no mercado para utilização na construção civil. A TABELA 1 apresenta um levantamento realizado por Kalnæs e Jelle (2015) sobre alguns produtos opacos que podem ser encontrados.

TABELA 1 – Materiais disponíveis no mercado.

FABRICANTE	PRODUTO	TEMP. TROCA FASE (°C)	CALOR LATENTE	PCM	ORIGEM	PRODUTO PARA CONSTRUÇÃO
Dupont	Energain	18-24	515kJ/m <sup>2</sup>	Parafina	Orgânico	Painel de massa térmica
Knauf	Comfort board			BASF micronal		Placa cimentícia
	Smartboard 23	23	200kJ/m <sup>2</sup>	BASF micronal		Placa cimentícia
	Smartboard 26	26	220kJ/m <sup>2</sup>	BASF micronal		Placa cimentícia
RGEES	HS22P	22	185kJ/kg		Inorgânico	Líquido
	HS24P	24	185kJ/kg		Inorgânico	Líquido
	HS29P	29	190kJ/kg		Inorgânico	Líquido
Phase Change Energy Solutions	BioPCMat M27	23		Bio-based	Orgânico	Tela preenchida com PCM
	BioPCMat M51	25		Bio-based	Orgânico	Tela preenchida com PCM
	BioPCMat M91	27		Bio-based	Orgânico	Tela preenchida com PCM
	Thermastix			Bio-based	Orgânico	Bastão preenchido com PCM
Salca	K-Block		590kJ/m <sup>2</sup>	Sal Hidratado	Inorgânico	Tela preenchida com PCM
SGL Group	Ecophit GC20	22	85kJ/m <sup>2</sup>			
	Ecophit LC20	22	140kJ/m <sup>2</sup>			

Phase Change Material Products Ltd.	FlatICE					Placa com PCM
	TubelICE					Tubos com PCM
	BallICE					Esferas com PCM
National Gypsum	ThermalCORE			BASF Micronal		Placas de gesso cobertas com PCM
H+H Deutschland	CelBLoc Plus			BASF Micronal		Blocos de concreto com PCM
Maxit Deutschland	Maxit Klima					Gesso com PCM microencapsulado
Tate	EcoCore	24	147Btu	Vegetable bio-based	Orgânico	Placas de piso

Fonte: Adaptado de Kalnæs e Jelle (2015)

As aberturas de vidro para o exterior podem permitir a troca excessiva de calor entre o ar interno e o externo. A utilização de um material que permita a passagem da luz solar, possibilitando a redução do consumo de energia interna para iluminação, mas que não permita um ganho ou perda tão grande de calor, poderia colaborar com o desempenho energético da edificação. Segundo Kalnæs e Jelle (2015) apenas um fabricante desenvolve, até este momento, produtos com a utilização de compostos PCM que reduzem a transmissão de calor, translúcidos. Na grande maioria os compostos PCM em sua fase líquida ou sólido não são completamente transparentes o que dificulta a produção de um produto que substitua o vidro transparente (FIGURA 7). Na TABELA 2 podem-se ver as características físicas do GlassX, esquadria com composto PCM.

FIGURA 7 – Processo de transição entre fases.



Fonte: (GLASSX)

TABELA 2 – Materiais translúcidos no mercado.

FABRICANTE	PRODUTO	TEMP. DE TROCA DE FASE (°C)	CAPACIDADE ARMAZ. CALOR	PCM	TIPO
GLASSX	GLASSX Crystal	26-30	1185	Sal Hidratado	Inorgânico
	GLASSX comfort	26-30	1185	Sal Hidratado	Inorgânico
	GLASSX slim	26-30	1187	Sal Hidratado	Inorgânico
	GLASSX store	26-30	1185	Sal Hidratado	Inorgânico

Fonte: Adaptado de Kalnæs e Jelle (2015)

De Gracia et al. (2010) estudaram PCMs, sais hidratados e parafinas, seu ciclo de vida e o impacto global. Deste trabalho concluíram algumas recomendações sobre o uso de PCM no ambiente construído:

- O estudo do uso de PCM deve ser calculado para todo o ano e não apenas para um intervalo de meses. O material tende a ser melhor em regiões com menor variação térmica durante as estações;
- Pela análise do ciclo de vida do cenário real, a utilização de sais hidratados e parafinas tem seu valor de impacto global recompensado em 25 e 61 anos respectivamente.
- A utilização de sais hidratados é recomendada, ao invés da parafina, devido à redução do impacto ambiental de manufatura.

## 2.2 APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS

Cabeza et al. (2007), apresentam uma pesquisa em que constroem e testam experimentalmente dois cubículos em concreto. Foram utilizados concreto convencional e um segundo concreto denominado “Mopcon”, ao qual foi adicionado aproximadamente 5% do PCM comercial Micronal® PCM (da indústria BASF). Nestes parâmetros foram consideradas situações de medições: janelas fechadas, janelas abertas todo o tempo ou janelas abertas somente durante um intervalo de tempo determinado pela pesquisadora. As medições foram realizadas entre os meses de abril e julho de 2005 na Espanha, portanto durante as estações primavera e verão. Apesar das variáveis apresentadas no trabalho, percebe-se a diminuição da variação térmica no caso do cubículo em que o concreto utilizado sofre adição do PCM.

Outra forma de estudo foi realizada na cidade de Amphiloquia na Grécia. Uma construção em tamanho real foi feita para analisar o efeito da utilização de PCM nas paredes externas da edificação. A casa com 151,23m<sup>2</sup> e dois pavimentos possui paredes em *steel frame* com duas camadas da placa cimentícia Knauf Smartboard. A

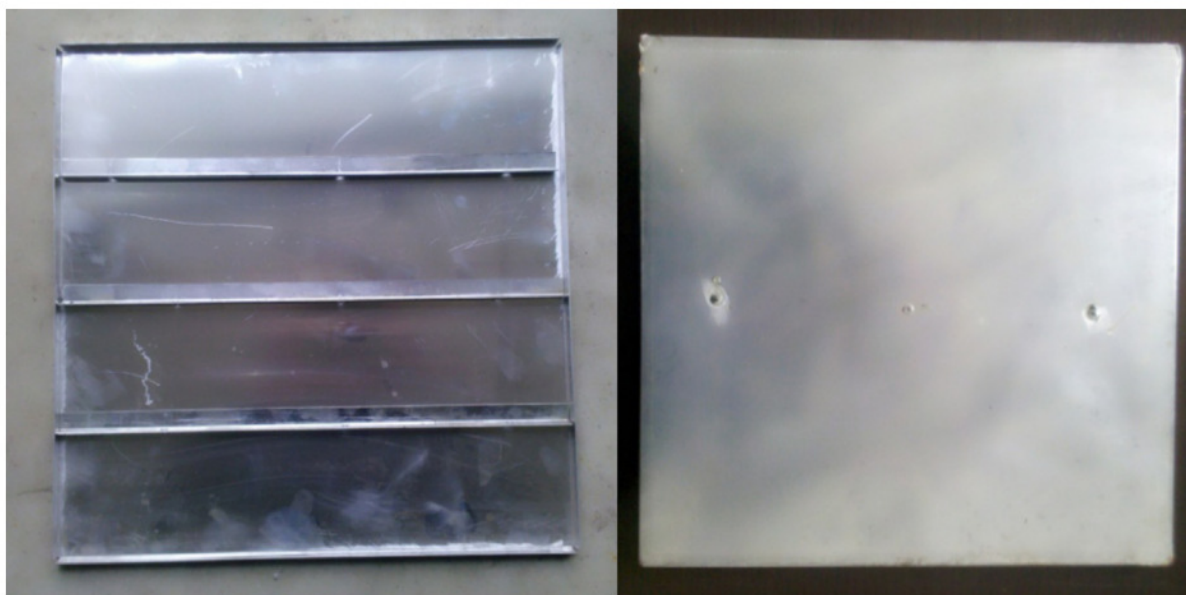
Smartboard contém PCM do tipo BASF Micronal com temperatura de fusão a 23°C. Nesse primeiro estudo em 2011, a casa foi monitorada eletronicamente com sensores em seu exterior e interior, e dividida em três zonas térmicas diferentes. A casa não foi habitada durante seu período de testes, portanto não foram consideradas cargas referente ao uso da edificação. Também não foi utilizado durante o período nenhum sistema de condicionamento de ar. Durante a pesquisa percebeu-se que houve um atraso de 100 minutos na transmissão de calor pelas paredes, o qual foi atribuído à implementação das placas cimentícias com PCM. (MANDILARAS et al., 2013)

Lee et al. (2015) apresentaram estudo, realizado no departamento de engenharia civil na Universidade do Kansas, Estados Unidos, comparativo experimental com a utilização de PCMs em casas teste na cidade de Lawrence, Estados Unidos. Foram construídas duas casas de 1,83m x 1,83m x 1,22m em *wood frame*: uma serviu de referência e à segunda foram aplicadas barreiras térmicas de PCM (sal hidratado). O material utilizado como barreira térmica tratava-se de um sanduiche de PCM entre duas folhas de alumínio e teve suas propriedades físicas levantadas por DSC. Como é comum em PCM de sais hidratados, notou-se o efeito *supercooling*, redução de temperatura abaixo do ponto de solidificação antes do início da mesma, causado por característica do material, porém o calor latente de solidificação não foi afetado. Após a validação comparativa entre as duas casas os estudos foram feitos colocando-se a barreira térmica em 5 posições diferentes das paredes sul e oeste. Um resultado importante foi a comprovação de que a posição da barreira térmica é de fato importante, havendo uma variação de até 40% da redução do fluxo de calor entre cada posição. Para a parede sul a redução dos fluxos de calor média entre todas as posições foi de 29,5%, para o pico do fluxo de calor 39,1%; já para a parede oeste, a média foi de 12,7%, e para o pico 23,3%.

Realizado em 2012, o experimento de Kong et al. (2013) desenvolveu uma nova mistura de composto PCM, ácido cáprico e *1-dodecanol* (álcool dodecílio, proveniente de ácidos graxos ou do fruto da palma), abreviado de CADE, e aplicou em um experimento em cubículos na China. Foram construídos três cubículos para implantação de três modelos diferentes: referência (sem a utilização de materiais com mudança de fase), aplicação de PCM no exterior (somente ácido cáprico) e aplicação de PCM internamente (CADE). Os PCMs foram utilizados por meio de macroencapsulamento (FIGURA 8), estando o material envolvido em lâminas de 1mm

de espessura de alumínio, perfazendo placas de 40x40cm. Na execução das placas procurou-se ter cuidado de permitir a maior transferência de calor entre o alumínio e o composto. O cubículo media 2,00mx2,00mx2,40m, continha uma porta de 0,80mx1,80m e uma janela de 0,80mx0,50m. Os três modelos foram testados com três configurações de regime de ventilação. No primeiro, durante todos os dias do ensaio não houve alteração na abertura da porta e janela; no segundo as esquadrias foram deixadas abertas durante a noite e no terceiro as esquadrias estavam sempre fechadas, porém havia ventilação forçada durante a noite. Os resultados mostraram três pontos a se destacar. Durante todo o experimento os cubículos com PCM, interna ou externamente, estiveram sempre 1°C ou 2°C abaixo da temperatura do modelo de referência. Os picos de energia entre o cubículo de referência e os cubículos com material de mudança de fase estavam afastados em até 3 horas, mostrando a maior inércia térmica nos casos com o uso de PCM. Por último, no comparativo entre o uso externo ou interno do material com mudança de fase, notou-se que, externamente, ele tem mais efeito como um isolante térmico, enquanto internamente o armazenamento de energia é sua principal função.

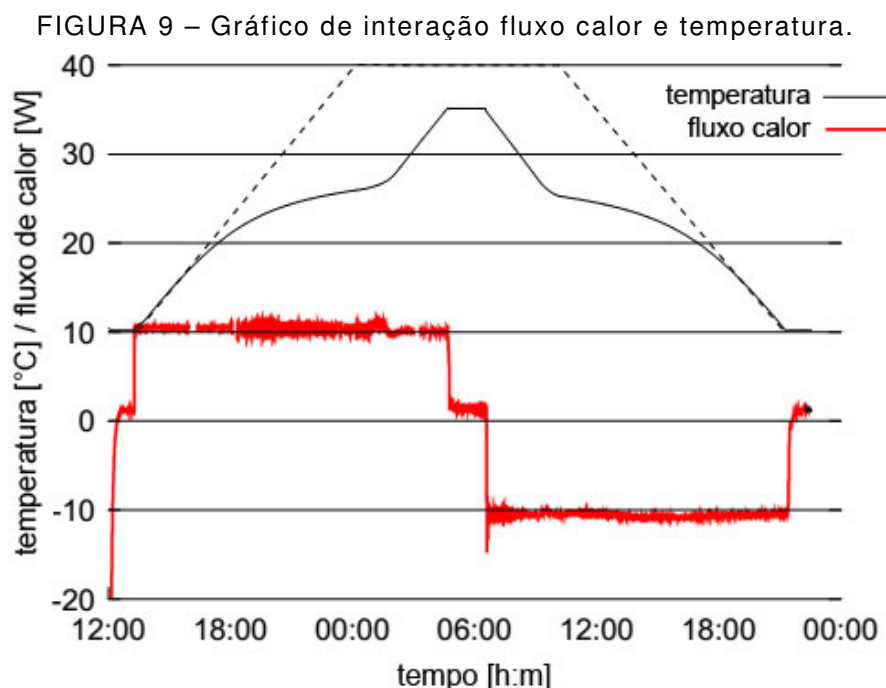
FIGURA 8 – Macroencapsulamento PCM



Fonte: (KONG et al., 2013)

## 2.3 ESTADO DA ARTE

Schossig et al. (2005) apresentaram pesquisa de análise numérica e experimental de um PCM microencapsulado incorporado a placas de gesso. Primeiramente, utilizando o software aberto esp-r simulou-se uma construção de paredes leves com placas de gesso. Levou-se em consideração uma ventilação de 4ac/h pela noite e 1ac/h durante o dia devido a necessidade de resfriamento do PCM para melhor funcionamento. O objetivo da simulação era procurar um composto específico para o modelo estudado que melhores resultados gerasse. O PCM idealizado teve ponto de fusão a 25°C e intervalo de fusão de 24°C a 26°C. Após essa etapa uma análise em laboratório foi realizada utilizando o mesmo material. O modelo de parede foi prensado entre duas placas de cobre que podiam ser aquecidas ou resfriadas independentemente. O desempenho térmico das paredes pode ser analisado pelo fluxo de calor e temperatura de superfície. A FIGURA 9 apresenta o resultado obtido em horas. Foi notável que comparado com a parede de referência (linha tracejada) a temperatura da parede com composto PCM (linha sólida preta) manteve-se 6 horas a mais na região de conforto idealizada (27°C). Este método pode ser utilizado para determinar a entalpia do material estudado, o que é muito importante para simulações. A última etapa da pesquisa fora um experimento de tamanho natural. Para evitar problemas de medições em ambientes existentes e não calibrados uns com os outros, foi construído um local de testes com método construtivo leve orientado para o sul. Foram realizadas as instalações de dois tipos de paredes com composto PCM e analisadas por um ano cada. No primeiro, a placa com composto PCM incorporado tinha 6mm (40% PCM) e no segundo 15mm (20% PCM). Novamente, percebeu-se que, enquanto a parede estava abaixo da temperatura de fusão do PCM a diferença com relação à parede de referência era mínima, porém, assim que a temperatura alcança o intervalo de fusão, a taxa de variação da temperatura da parede com composto PCM caiu abruptamente. A diferença no segundo caso analisado chegou a 4°C entre o pico do valor de referência e a parede testada. O autor discute ainda a necessidade de o PCM ser dimensionado levando em conta o objetivo final do uso do material e a necessidade de ventilação do material para otimização do uso.

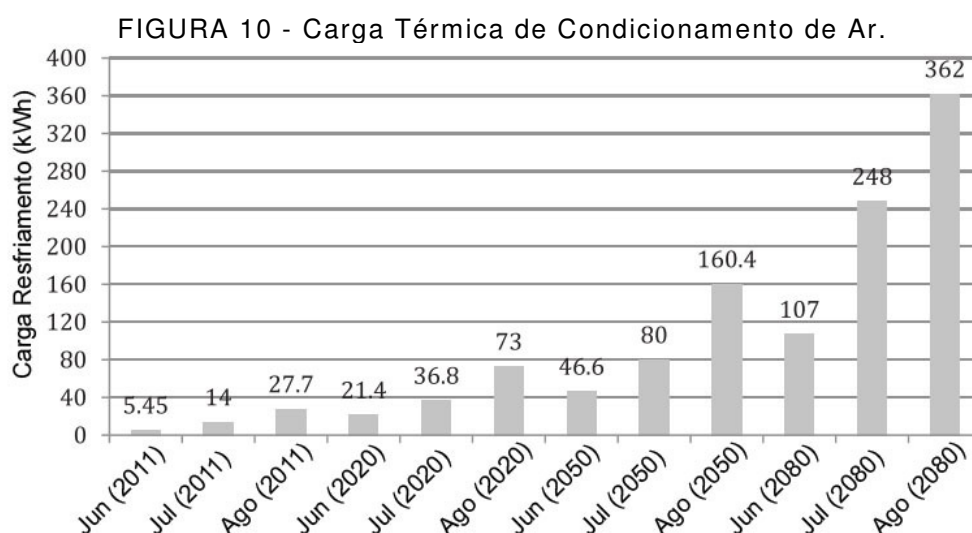


Fonte: (SCHOSSIG et al., 2005)

Na pesquisa realizada por Halford e Boehm (2007) foi analisado um modelo matemático calculado por meio do software MATLAB, simulando o comportamento termodinâmico de um PCM (sal hidratado) e seu impacto em um sistema “Isolante+PCM+Isolante”. A pesquisa comparou os resultados da transferência de calor e seus desdobramentos quanto a possíveis reduções de picos de energia necessária para o condicionamento do ar. Foram analisados três casos: 1) utilização de PCM entre duas camadas isolantes de lã de vidro; 2) uma situação teórica ignorando o gasto de energia para a troca de fase; 3) apenas as duas camadas isolantes. Os resultados comparativos mostraram que a utilização de PCM considerando as trocas de fases implica em uma redução de 11 a 25% de carga energética para resfriamento em comparação ao caso 2 e uma redução entre 19 a 57% de carga energética na comparação com o caso 3. Essa variação da porcentagem de economia energética existiu devido às considerações de temperatura interna limite (28°C) para início da utilização de um sistema de resfriamento.

Sajjadian et al. (2015) apresentaram um estudo realizado com as bases climáticas para a cidade de Londres estimadas para os próximos sessenta anos, entre 2011 e 2080, e a utilização de placas com compostos PCM. Os autores definem um modelo de residência e suas lajes, forros e paredes com todas as suas camadas e características térmicas, propondo então a adição de placas com composto PCM para

estudar e comparar ambos os casos. Definida a estratégia de utilizar câmara de ar e placas de PCM na face interna da parede de vedação, simulou-se qual a melhor espessura e melhor ponto de fusão do material com mudança de fase a ser utilizado, sendo definido 25mm de câmara de ar e 48mm de espessura da placa de PCM com ponto de fusão a 25°C. Realizada a modelagem e a simulação pelo software privado DesignBuilder, percebeu-se, entre 2011 e 2080, um aumento na faixa de 400% de horas de desconforto térmico na construção com a utilização de *steel frame*. Isto leva a uma carga térmica de condicionamento de ar 13 (treze) vezes maior em 2080 se comparado a 2011 (FIGURA 10). O próximo passo foi rodar a simulação considerando a utilização das placas de PCM. De fato, foi perceptível uma redução nas cargas energéticas de condicionamento de ar. Porém, isso fica mais evidente a partir de 2050, ou seja, apenas com o aumento das temperaturas, conforme simulação de dados futuros, a utilização das placas com composto PCM apresenta seu melhor potencial. Apesar disso, os autores ainda apresentam situações em que as placas não conseguem conter toda a energia proveniente das trocas de calor com o ambiente e a temperatura interna sobe além do limite estabelecido como região de conforto para a pesquisa. Sajjadian ainda reflete a respeito da utilização de placas PCM sob as características climáticas atuais da cidade de Londres não ter melhores resultados com o uso desta tecnologia.

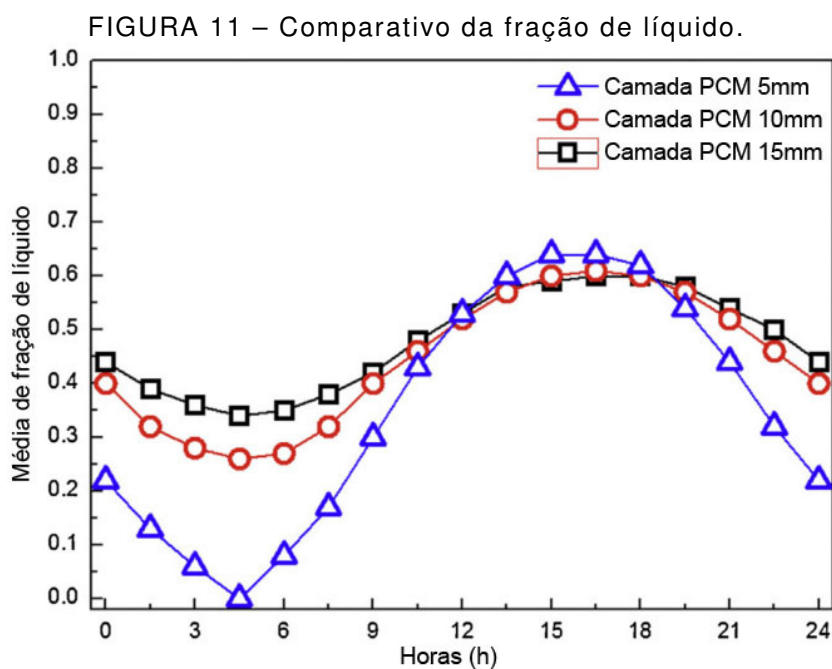


Fonte: Sajjadian et al. (2015)

Wang e Zhao (2015) analisam parametricamente um sistema de esquadrias que contém vidro, câmara de ar e placa PCM, e como as variáveis desse sistema



podem influenciar na transmissão de calor externo para ambiente interno. Baseando-se em um modelo matemático discreto são analisadas algumas variações possíveis para esse sistema: espessura da câmara de ar, espessura e temperatura de fusão do PCM. Notou-se durante a pesquisa que, como já visto em outros casos, dentre as espessuras de placas PCM apresentadas, a que apresentava maior valor obtém melhor resultado na redução da transmissão de calor. Apesar disso, os autores constataram que, devido ao método utilizado, muita massa do PCM não sofreu transformação de sólido para líquido, ou seja, a fusão do material não foi completa, e, portanto, muito do material utilizado não foi aproveitado para conter o calor proveniente do exterior durante a troca de fase. A FIGURA 11 mostra um gráfico comparativo entre as placas das três espessuras analisadas na pesquisa e suas porcentagens de líquido durante as horas do dia. Fica perceptível nesta figura que apesar da camada de 15mm ser mais efetiva no controle de entrada de calor, o material não tem seu potencial muito explorado; é notável que a taxa de material que sofre troca de fase é muito reduzida se comparada à camada de 5mm. Os autores finalizam o trabalho comentando a redução de até 30% de transmissão de calor, no caso da placa PCM de 15mm, porém a esquadria sofre a perda de luminosidade que a placa opaca ocasiona.



Fonte: Wang e Zhao (2015)

A aplicação de PCM em materiais de construção vem sendo bastante discutida na bibliografia. Soluções de incorporação à elementos construtivos comuns também vêm sendo estudadas como possíveis inovações. Silva et al. (2012) da Universidade de Aveiros, Portugal, estudaram a possibilidade de incorporação de PCM (RT18) à tijolos cerâmicos. A opção por utilização de material orgânico se deu à razão deles serem inertes quimicamente, não corrosivos e compatíveis com a maioria dos materiais de construção. A pesquisa desenvolveu-se em três etapas, condições climáticas e definição das propriedades do material; especificação, construção e testes experimentais do material físico; modelagem e validação numérica. O estudo experimental apresentou que de fato a incorporação do PCM reduz a amplitude térmica (para 25mm de PCM, 22%) e aumenta o atraso da transmissão de calor. Porém a variação entre 19mm e 25mm de PCM não contribui de maneira significativa à redução da amplitude térmica do interior. A simulação numérica do estudo observou uma divergência de resultados em relação a temperatura que podem ter ocorrido pelas hipóteses consideradas na simulação quanto ao material PCM estudado. Devido à escala do experimento, diferenças entre o modelo físico e o simulado tendem a ficar mais evidentes.

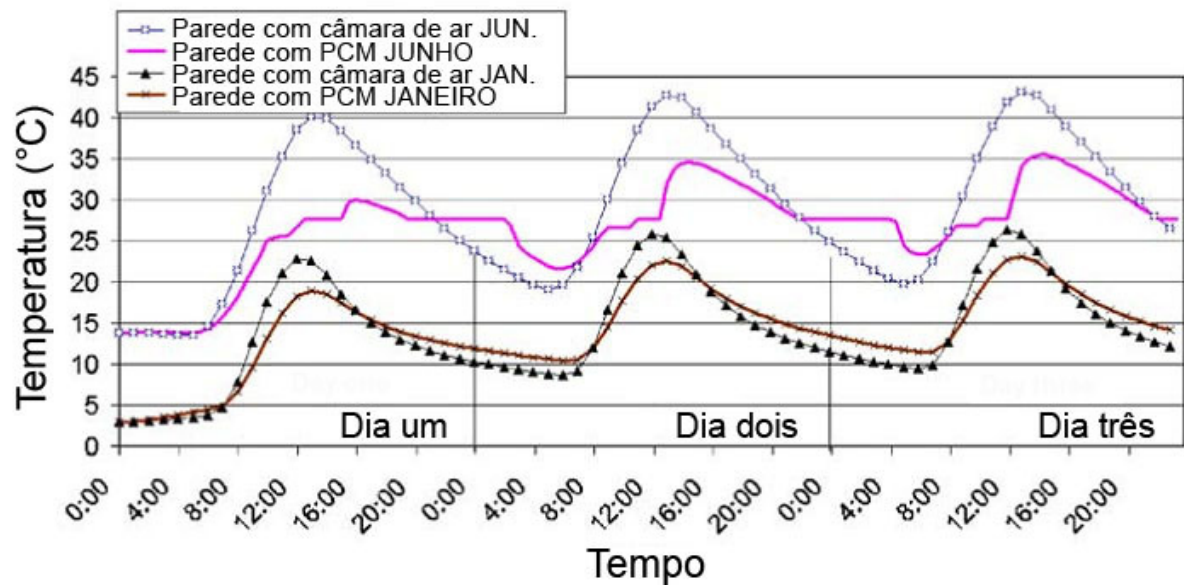
Em estudo realizado em Madrid por Izquierdo-barrientos et al. (2012) um modelo matemático fora desenvolvido para o estudo da transferência de calor em uma parede com PCM. Um comparativo entre quatro tipos de paredes externas, com e sem camada de PCM (PCM Rubytherm GR), foi realizado para estudar a transferência de calor instantânea pela parede. A simulação considerou o clima da cidade de Madrid em dois conjuntos de datas, 6 dias de verão e 6 dias de inverno, e variou-se a orientação das paredes estudadas. Os resultados levaram a conclusão por parte dos pesquisadores que não é tão clara a temperatura de fusão ideal do composto PCM para todos os casos, nem mesmo para um único clima. A utilização da camada PCM para o inverno ou verão, orientação norte, leste, oeste ou sul e a localização da camada na parede, interna ou externamente, podem apresentar grandes variações e resultados surpreendentes. O estudo procurou analisar os casos que reduzissem a transferência de calor para maior eficiência energética, reduzindo assim gastos desnecessários com condicionamento de ar. Os autores enfatizam a necessidade de um estudo cuidadoso do composto e as variáveis apresentadas no trabalho, pois o composto apresentou um comportamento surpreendente devido à alta inércia térmica

do tipo de parede utilizada. Foi notado que para alguns casos a camada PCM gerava transmissões de calor inversas ao ideal. *“Para o inverno, os totais de perda de calor durante o período de sol e sem sol foram reduzidos e aumentados, respectivamente. O oposto foi observado para os dias de verão”.*

De Gracia et al. (2015) refletem sobre a complexidade dos métodos atuais para estudo da influência da incorporação de PCM sobre a transferência de calor. Descrevem no artigo alguns modelos numéricos para aplicação de análises segundo bibliografia anterior e propõem um método simplificado para estudo do desempenho de fachadas ventiladas com PCM em seu interior para efeito de resfriamento. Os autores propõem a utilização de modelo isotérmico. Assume-se então que o processo de troca de calor entre o fluxo de ar, por entre a cavidade de ar, e os painéis PCM ocorrem em condições isotérmicas. O modelo proposto então é validado com a comparação entre um modelo de volume de controle finito (fonte de bibliografia anterior) e medições experimentais. Os resultados numéricos foram rodados para os dados climáticos cidade de Puigverd de Lleida, Espanha, para os dias de 15 de junho e 22 de julho de 2014, e utilizaram-se painéis CSM com macroencapsulamento de PCM RT21 (Rubitherm Technologies GR). O método isotérmico, mesmo apresentando resultados piores que o método de volume de controle finito, pode prever com precisão a temperatura do composto PCM durante o aquecimento, armazenamento e descarga do calor com variação abaixo de 3%. Concluiu-se também que a temperatura externa pode ser prevista com sucesso.

Utilizando a simulação numérica realizada por Huang et al. (2004) já validada, a pesquisa apresenta uma investigação quanto aos resultados da incorporação de PCM a paredes externas de um ambiente construído. Considerou-se como valor de referência uma parede com câmara de ar do tipo, tijolo (11cm), câmara de ar (3cm), bloco de concreto (10cm) e gesso (1cm). Os PCMs utilizados foram GR27 e GR41 (Rubitherm), com pontos de fusão 28°C e 43°C, respectivamente. A simulação foi estudada durante 3 dias com dados climáticos dos dias 21 de janeiro e 21 de junho do sudeste da Inglaterra. O resultado mais significativo apresentou-se para o PCM GR27 (FIGURA 12), para o qual se percebeu que realmente ajuda a manter a temperatura interna da superfície da parede, satisfazendo os requisitos de conforto térmico e prevenindo a formação de condensação na câmara de ar durante o período simulado de janeiro (HUANG; EAMES; HEWITT, 2006).

FIGURA 12 – Comparativo paredes com e sem PCM.



Fonte: Adaptado (HUANG; EAMES; HEWITT, 2006)

Fiorito (2014) apresentou uma simulação de uma sala comercial na cidade de Sydney, Austrália, com a parametrização de algumas variáveis sendo uma delas a utilização de PCM. O modelo de 25m<sup>2</sup> de área foi concebido com materiais construtivos leves e bem isolado termicamente. Os seguintes elementos foram considerados na parametrização do PCM:

- Integração de PCM nas paredes sul, norte e partições internas;
- Posição do PCM, interna ou externamente a parede;
- Espessura do PCM;
- Intervalo de mudança de fase do PCM.

É importante afirmar que este estudo avaliou as condições e horas de desconforto térmico levando em conta as cargas térmicas de usuários, iluminação, equipamentos e ventilação por infiltração, e natural direta. O autor utilizou para esse estudo quatro tipos principais de PCM, RT21, RT27, RT31 e RT42, sendo as principais diferenças entre eles o intervalo de mudança de fase, 13°C a 28°C, 20°C a 35°C, 23°C a 28°C e 35 a 50°C, respectivamente. A simulação foi rodada pelo software EnergyPlus durante uma semana de verão e uma semana de inverno. Uma conclusão interessante é a de que, mesmo com as cargas operacionais consideradas, há uma estabilização da variação da temperatura interna da superfície da parede. O autor também percebeu que em paredes com barreiras térmicas muito bem isoladas a

integração de PCM nas camadas internas não melhora o desempenho térmico. Como variou-se durante a pesquisa materiais com temperaturas de fusão diversas, foi possível para o autor discutir a importância desta variável para cidade em que se aplica o estudo. Para o caso de Sydney, o melhor material foi o RT27 que tem seu ponto de fusão mais próximo ao intervalo de temperaturas média da cidade.

O artigo apresentado por Kosny et al. (2012) relata o desenvolvimento de um trabalho realizado com PCM com base biológica (*bio-based*). Foi realizada uma análise experimental e teórica a respeito da dinâmica térmica do material estudado. Primeiramente, testou-se experimentalmente as características e propriedades de transmissão de calor e entalpia da placa com PCM microencapsulado escolhida. Após este momento esses dados foram simulados através de um modelo matemático simplificado em que se verificou o fluxo de calor pela parede. Foi considerada para todas as simulações a mesma parede de referência com isolamento de 14cm de espessura com ou sem impregnação de 30% de PCM. As placas com PCM foram colocadas no centro da parede a ser estudada. Os cálculos foram realizados para três cidades, Varsóvia, Cairo e Marselha e, para todas elas, houve redução do fluxo de calor durante quatro dias de verão. Para Cairo e Marselha o ganho de calor foi reduzido entre 21-25% e 23-37% respectivamente. Os autores discutem também o atraso médio de 3 horas entre os picos de fluxo de calor dos modelos com e sem placas com PCM.

Soares et al. (2014) da Universidade de Coimbra estudaram com a ajuda dos softwares EnergyPlus e GenOpt algumas variações possíveis da utilização de PCM em paredes externas de uma edificação para 7 cidades europeias. Considerada uma residência de zona térmica única, simulou-se a temperatura interna do ambiente construído sob a variação dos seguintes itens: temperatura de fusão do composto PCM (18°, 20°, 22°, 24°, 26° e 28°C), espessura do composto (1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5 e 4cm), cor interna e orientação da edificação (norte, sul, leste e oeste). A combinação de possibilidades que teriam que ser simuladas no EnergyPlus eram da casa de mais de  $35 \times 10^9$  simulações. Para isso foi utilizado o GenOpt que gerenciou a parametrização dos elementos e acionou as simulações. O objetivo do trabalho foi entender o comportamento do PCM em uma simulação em que se incluía elementos mais próximos da realidade; para isso os autores consideraram cargas de iluminação e equipamentos, pessoas e necessidade de aquecimento ou resfriamento do

ambiente, de acordo com os horários de funcionamento da residência. Os resultados foram analisados mês a mês e anualmente, e procuraram entender as possíveis reduções quanto à carga de condicionamento de ar necessária para a zona em questão. De fato, a espessura ótima do composto foi de 4cm de espessura e as temperaturas de fusão para climas mais quentes entre 22 e 26°C, para mais frios entre 18 e 24°C. Seguem alguns resultados interessantes. Para Sevilha e Coimbra a economia de energia devido à utilização do composto PCM foi de 46% e 62% respectivamente, maior parte devido à redução da necessidade de resfriamento. Para Warsaw e Kiruna, onde a predominância do consumo de condicionamento de ar é para aquecimento, houveram reduções de 24% e 10% respectivamente. Em cidades como Milão, Paris e Bucareste, a redução fica entre 33% e 38% entre o total de aquecimento e resfriamento. A pesquisa aponta a necessidade do estudo não apenas para os meses de extremo frio ou calor, haja visto cidades como Milão e Paris onde as maiores reduções acontecem no outono e primavera.

Como pode ser visto nesta revisão bibliográfica, é notável a possibilidade de melhora do desempenho térmico e energético. Por consequência, há aumento do conforto interno no ambiente construído com a utilização de materiais com mudança de fase em paredes externas. Porém, a escolha e incorporação desses materiais a elementos construtivos deve ser estudada com atenção à localidade, orientação, espessura e posição (interna ou externa ao elemento). As pesquisas apresentadas estudam os sistemas via cálculos numéricos ou simulações, em ambos os casos com validação dos resultados. A opção pelo trabalho de simulação numérica de um modelo com a utilização de PCM segue a linha das últimas pesquisas deste tema, tentando compreender, em termos de desempenho térmico e energético da edificação, o real funcionamento desses materiais na construção civil.

### 3. METODO

#### 3.1 UNIDADE DE ANÁLISE

A unidade de análise desta pesquisa foi o material com mudança de fase (PCM) incorporado às vedações externas.

A utilização do material deu-se como uma camada da parede externa da edificação projetada para o estudo e teve seu impacto simulado em comparação ao valor de referência determinado no item 4.1.

#### 3.2 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Serão apresentados neste trabalho o potencial de redução do consumo de energia de um escritório comercial, com operação diurna em um edifício construído com estrutura de concreto armado e envoltória em alvenaria, situado em oito cidades de diferentes regiões do Brasil, sob o impacto da utilização do material com mudança de fase (composto de ácido cáprico e álcool dodecílico) na parede externa do modelo físico definido.

As análises foram baseadas em propriedades dos PCMs apresentadas na bibliografia, assim como as de todos os materiais e elementos envolvidos no modelo matemático desenvolvido. Este trabalho não teve como foco o desenvolvimento de parâmetros para o material estudado, apenas tentou entender os pontos fortes e fracos da utilização para as cidades as quais foi aplicado.

#### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo Yin (2001) estratégias de pesquisa em que haja o controle de eventos comportamentais, ou seja, há o controle de variáveis, e trata-se de eventos contemporâneos, são chamadas de experimentos. *“...são realizados experimentos quando o pesquisador pode manipular o comportamento direta, precisa e sistematicamente”*.

Ao escolher o estudo por modelagem matemática para simulação de desempenho energético definiu-se que trata-se de um experimento, pois serão alteradas algumas variáveis e mantidas outras conforme sugerido por Robson (2002). Pelo mesmo autor trata-se de uma pesquisa fixa por obter resultados quantitativos.

### 3.4 TESTES DE VALIDADE

Para garantir-se a eficácia do método e sua possível reprodução, ou a reprodução deste trabalho, Yin (2001) apresenta quatro testes, chamados *testes de validade* que têm como foco diminuir a quantidade de possíveis erros de metodologia.

#### 3.4.1 VALIDADE DO CONSTRUCTO

Este trabalho utiliza para as simulações um algoritmo desenvolvido pelo orientador desta pesquisa professor George Stanescu, este modelo, apesar de utilizar as bases teóricas da termodinâmica e transmissão de calor entre materiais, ainda não foi testado e calibrado com um experimento de campo. Desta maneira optou-se por comparar os resultados dos cálculos obtidos por este algoritmo com um modelo idêntico, com as mesmas medidas, propriedades de materiais, simulados para o mesmo espaço de tempo e com a mesma base de dados. Foi utilizado para comparação o software EnergyPlus desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos cujos resultados já foram comparados com experimentos e calibrados em bibliografia prévia.

#### 3.4.2 VALIDADE INTERNA

Para todas as cidades estudadas foram definidos, como será apresentado no capítulo referente ao modelo físico, dois cenários de cálculo. Utilizando para ambos as mesmas propriedades de materiais, camadas internas às paredes, base de dados climáticas, incluindo-se apenas uma camada extra com o material de mudança de fase situada no meio da parede externa do volume de controle. As diferenças de valores obtidos de temperatura, carga térmica e consumo energético, foram resultados diretos da inclusão do PCM na parede externa, justamente o efeito que procurou-se neste trabalho.

#### 3.4.3 VALIDADE EXTERNA

Os resultados serão apresentados com base nos dados climáticos de temperatura e umidade para oito cidades estudadas. Apesar das propriedades de materiais serem invariáveis, as condições térmicas das cidades estudadas são



características somente desta. Portanto os dados obtidos poderão ser generalizados apenas para as cidades em questão e para os sistemas de vedação estudados.

### 3.5 CONFIABILIDADE

O procedimento no protocolo de coleta de dados apresentará todos os passos de levantamento dos dados característicos a cada variável a ser estudada e desenvolvimento do método numérico para análise dos mesmos. Como os resultados deste trabalho dependem exclusivamente dos dados de entrada e do modelo matemático, o processo pode ser replicado.

### 3.6 PROTOCOLO DE COLETA E METODO DE ANALISE DE DADOS

Esta pesquisa trata-se de uma simulação aproximada da realidade com base em dados históricos e experimentais, experimento fixo segundo Robson (2002). A intenção desta dissertação foi identificar, ou não, o potencial da utilização de materiais com mudança de fase para a construção civil nas cidades estudadas. Para tal, o controle de variáveis é imprescindível. A validade dos resultados passa pela certificação da origem das bases de dados e propriedades dos materiais utilizados pelo modelo matemático. Neste item serão descritas as etapas de trabalho realizadas para o desenvolvimento do trabalho.

Referencial Teórico – Busca por pesquisas acerca de itens pertinentes a materiais com mudança de fase. Análises do material, experimentos já realizados e o estado da arte.

Algoritmo – Adaptação do algoritmo às necessidades das definições e materiais a serem utilizados.

Definição modelo físico – Delimitação do uso e do tipo de ambiente a ser utilizado na simulação. Definição dos materiais e métodos construtivos, geração de energia interna. Estabelecimento do referencial para os comparativos futuros.

Definição de conforto térmico – Escolha da definição de conforto térmico, para uma determinação da faixa de temperatura de conforto segundo a bibliografia adotada.

Casos simulados – Definição das variáveis a serem alteradas para cada cenário e escolha das cidades para o qual o algoritmo será simulado.

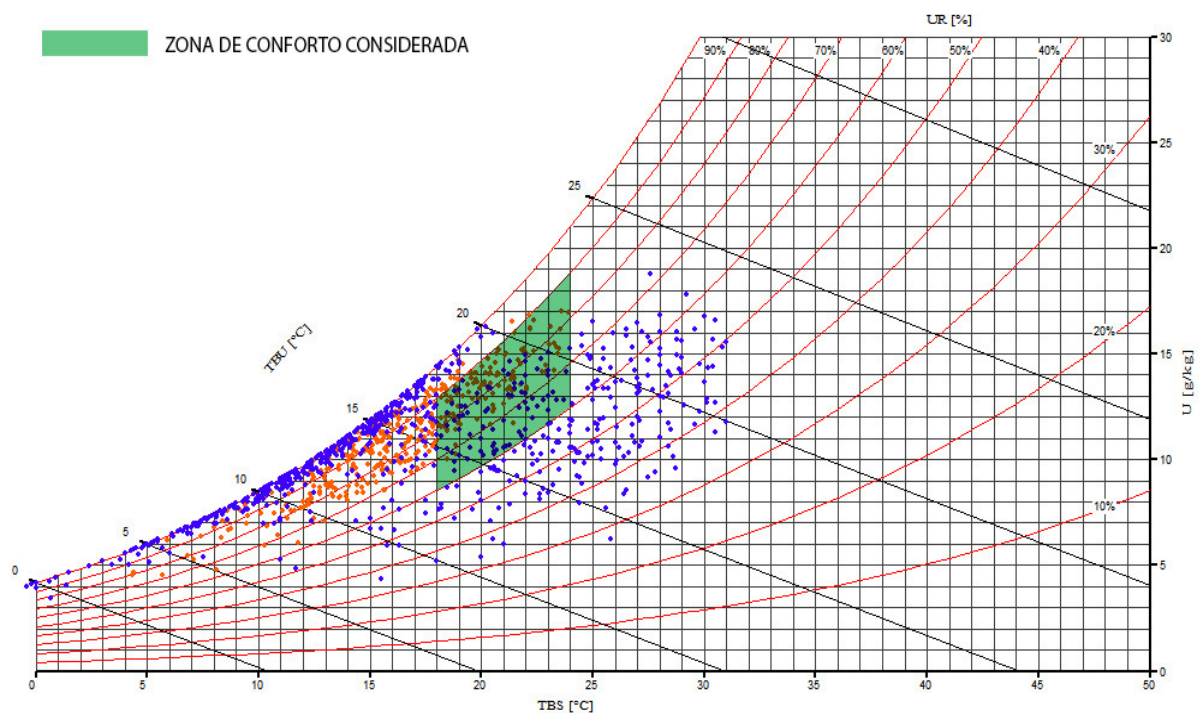
Simulação dos casos – Execução dos algoritmos para cada um dos casos determinados.

Análise dos resultados – Comparativo entre cada caso simulado e os valores de referência. O objetivo nesta etapa é quantificar o potencial de redução do consumo de energia para cada cenário. Gráficos e tabelas serviram de auxílio para demonstração dos efeitos da alteração das variáveis do experimento.

#### 4. DEFINIÇÕES DE SIMULAÇÃO

O potencial do material com mudança de fase para a redução do consumo de energia em ambientes construídos, dado como objetivo, tem como foco a manutenção do conforto térmico interno. A análise do conforto térmico e de possíveis estratégias de atuação para manutenção do mesmo é frequentemente explicada através de cartas psicrométricas. Na carta psicrométrica (FIGURA 13) da cidade de Curitiba os pontos azuis representam as temperaturas máximas e mínimas, e os pontos na cor laranja as temperaturas médias para todos os dias do ano, cada um com dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa. Também é apresentada uma faixa na cor verde que representa o intervalo de conforto térmico. Nota-se claramente, levando apenas em consideração a temperatura, que apenas uma pequena parte das médias diárias encontram-se nesta área. Ou seja, é clara a necessidade de ação, seja por métodos passivos ou ativos, para a manutenção da faixa de conforto internamente.

FIGURA 13 – Carta Psicrométrica para Curitiba, Brasil, com a faixa de conforto utilizada.



Fonte: O Autor.

De maneira a simplificar o modelo, e considerando que este trabalho não tem como foco o aprofundamento sob as teorias de conforto térmico, utilizaram-se os valores de 18°C como valor mínimo ( $T_{minimo}$ ) e 24°C como máximo ( $T_{maximo}$ ). A

umidade interna não foi controlada neste algoritmo; apesar da mesma ser calculada hora a hora no volume de controle, apenas a faixa de temperatura foi mantida durante as simulações.

As construções têm como objetivo criar um ambiente seguro das intempéries e acolhedor ao ser humano. O consenso atual dos métodos construtivos da construção civil brasileira nem sempre considera os efeitos da envoltória da edificação no ambiente construído interno e seu comportamento do ponto de vista térmico. Mesmo após a publicação das normas NBR 15.220 e NBR 15.575 não houve alteração notável no cenário da construção. Pesquisas que mostrem que a preocupação sobre materiais, técnicas construtivas, estratégias projetuais, podem ajudar a alterar este panorama e é de grande importância para a sociedade considerando as justificativas apresentadas neste texto.

Este trabalho discutirá não somente números de kWh economizados mês a mês, mas sim potenciais de redução através de novos entendimentos da ação dos materiais e equipamentos em função do ambiente construído. Também discutirá os desperdícios energéticos (em outras palavras entropia) se considerado o sol como fonte de energia.

Os cenários de simulação definidos serão rodados para um ano inteiro.

#### 4.1 MODELO FISICO

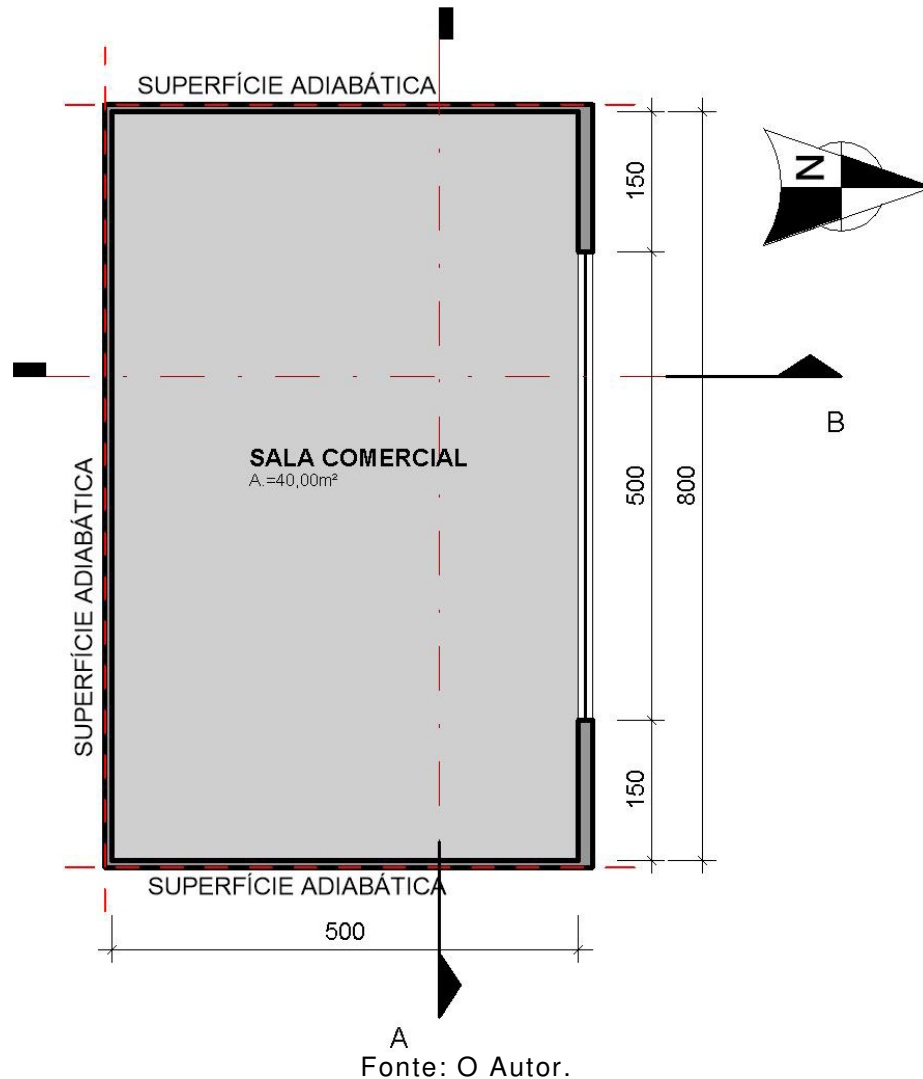
Para esta pesquisa uma sala comercial situada no 25º andar de um edifício, foi utilizada como modelo físico de única zona para os cálculos de temperatura e carga térmica.

Sendo o foco desta pesquisa o potencial do uso de camadas de composto PCM na parede externa do volume de controle, buscou-se um modelo em que haja o maior controle possível dos resultados que possam interferir nas conclusões. Com uma única face voltada para o exterior, sendo esse o único sentido de entrada e saída de energia, fica mais evidente o potencial, ou não, do uso de materiais com mudança de fase na construção civil para as cidades estudadas.

A sala comercial tem medidas de 8 (oito) metros de largura e 5 (cinco) metros de profundidade, com 3 (três) metros de altura interna, perfazendo assim 40 (quarenta) metros quadrados e volume de 120 (cento e vinte) metros cúbicos. Na

parede externa existe uma janela de 7 (sete) metros quadrados. A planta pode ser vista na FIGURA 14.

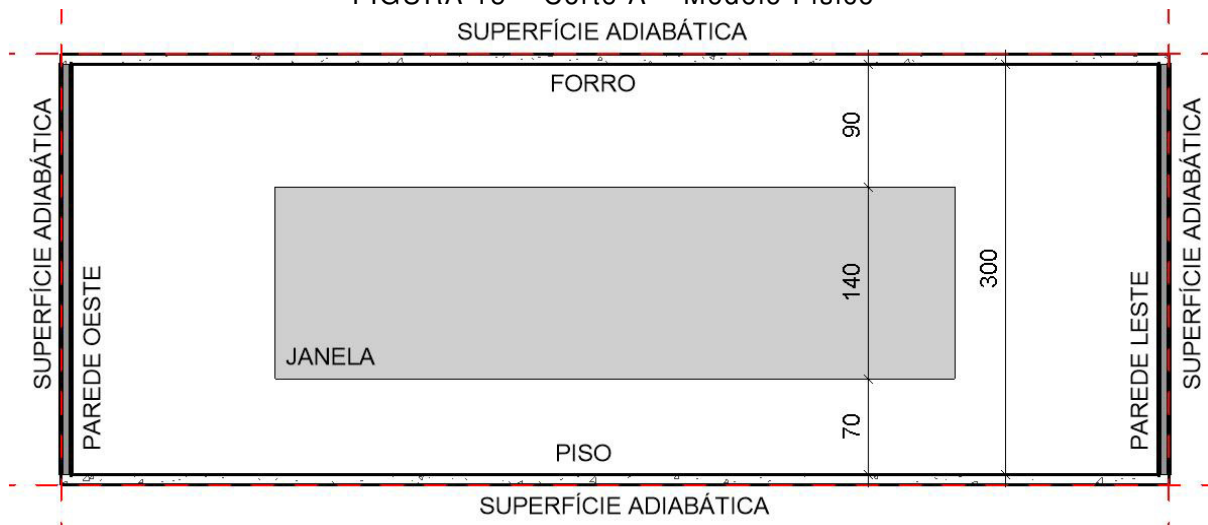
FIGURA 14 – Planta modelo físico.



Fonte: O Autor.

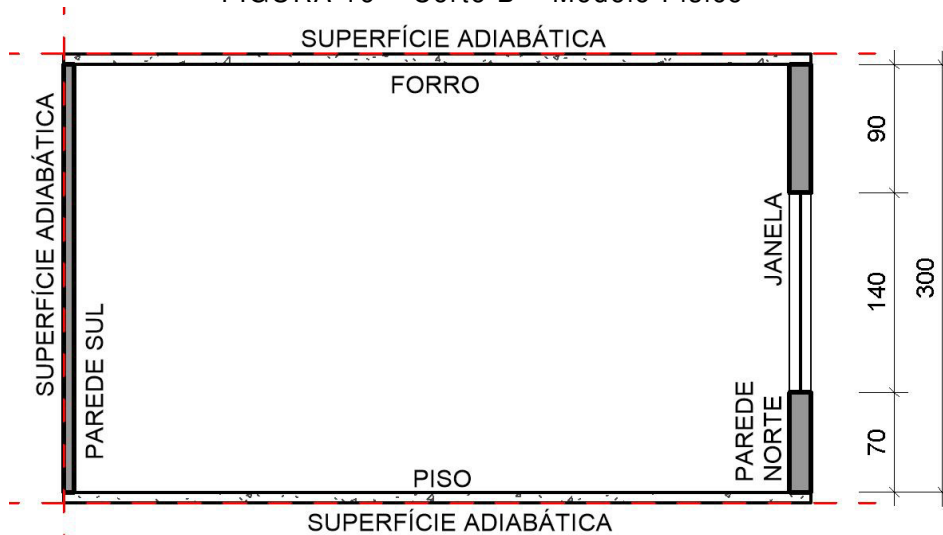
O ambiente considerado possui uma parede voltada para o norte, a face na qual se encontra a janela. As outras três paredes, forro e piso foram consideradas adiabáticas. Os cortes A e B estão representados na FIGURA 15 e FIGURA 16, respectivamente.

FIGURA 15 – Corte A – Modelo Físico



Fonte: O Autor.

FIGURA 16 – Corte B – Modelo Físico



Fonte: O Autor.

Quanto aos acabamentos internos, a sala possui pintura na cor branca nas paredes e forro, e assoalho de madeira natural no piso. Externamente a parede voltada para o norte também tem pintura na cor branca.

Como padrão de uso e geração de calor interna do ambiente, foi considerada como exemplo uma sala de área similar na cidade de Curitiba (FIGURA 17).

FIGURA 17 – Foto escritório exemplo



Fonte: O autor.

## 4.2 GERAÇÃO INTERNA DE CALOR

Foram considerados 1,5m<sup>3</sup> de mobiliário de MDF (*Medium Density Fiberboard*), material comumente utilizado no feitiço de mobílias residenciais e comerciais na cidade de Curitiba, Brasil, quatro cadeiras de escritório em ferro e plástico, quatro cadeiras de reunião, mesa de reunião em madeira e vidro, e painel em MDF. Esses dados foram inseridos no modelo matemático de maneira a considerar a massa térmica destes materiais, o chamado fator de mobília.

Também contém os seguintes equipamentos elétricos fontes de calor, quatro computadores, quatro monitores, duas impressoras e a iluminação. Dentro do volume de controle foi estimado também que trabalham quatro pessoas dentro do horário de funcionamento definido. O QUADRO 2 apresenta um resumo da geração interna de calor dentro do volume de controle.

QUADRO 2 – Descrição geração energia interna

Quantidade	Descrição	Potência
04	Pessoas	80W
04	Computadores e Monitores	50W
02	Impressora	2W
01	Iluminação	50W

Fonte: O autor.

A quantidade de geração de calor por item apresentado no quadro 2 foi retirada do livro Climate Design por Hausladen (2005).

Como o modelo físico trata-se de um escritório comercial é importante delimitar o horário de funcionamento, haja visto que as cargas internas serão geradas apenas dentro deste horário. As datas aqui citadas referem-se ao ano de 2015, tomado como padrão. Foram considerados três tipos de dias padrão, dia de semana (entre segunda-feira e sexta-feira), sábado e domingo ou feriado. Nos dias de semana foi considerado horário de funcionamento das 9:00 às 18:00. Para o sábado das 9:00 às 14:00. Domingos e feriados não há expediente. Como feriados foram definidos apenas os nacionais (QUADRO 3).

QUADRO 3 – Feriados Nacionais

Data	Feriado
01/jan	Ano Novo
17/fev	Carnaval
18/fev	Quarta-feira de cinzas
03/abr	Sexta-feira da Paixão
21/abr	Tiradentes
01/mai	Dia Mundial do Trabalho
04/jun	Corpus Christi
07/set	Independência do Brasil
12/out	Padroeira do Brasil
02/nov	Finados
15/out	Proclamação da República
25/dez	Natal

Fonte: O autor.

### 4.3 VENTILAÇÃO

A ventilação para o ambiente definido foi considerada constante; o algoritmo considera ventilação sempre que existam pessoas no volume de controle. Foi adotado o valor de 0,9 l/s/m<sup>2</sup> conforme norma de condicionamento de ar e qualidade do ar interno, NBR 16401 (ABNT, 2008). A não ventilação durante todas as horas do dia otimiza o armazenamento de energia internamente, fato a ser analisado no capítulo de resultados.



#### 4.4 MATERIAIS E PROPRIEDADES DE REFERÊNCIA

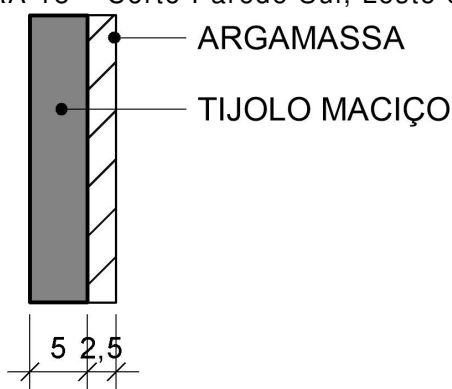
A proposta desta pesquisa não trata somente da busca por novos materiais. A implementação de um ambiente com uso adequado à realidade acrescenta nova dimensão à simulação. Os materiais utilizados são partes fundamentais deste processo e possuem a mesma importância de todos os outros itens citados.

A pesquisa aqui descrita baseia-se em um valor de referência que inclui tudo o que fora até este ponto apresentado, medida do volume de controle, geração de cargas e usos internos, e também as propriedades físicas de materiais a serem apresentadas neste item.

O modelo físico contém quatro paredes (norte, sul, leste e oeste), um forro e um piso.

As paredes sul, leste e oeste são definidas de dentro para fora com uma camada de argamassa de 2,5cm de espessura e uma camada de tijolo maciço de 5cm (FIGURA 18).

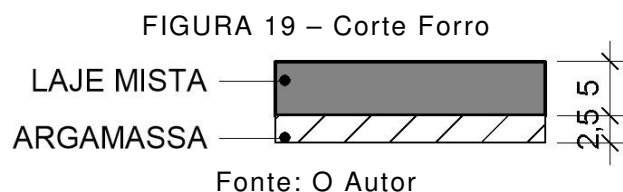
FIGURA 18 – Corte Parede Sul, Leste e Oeste



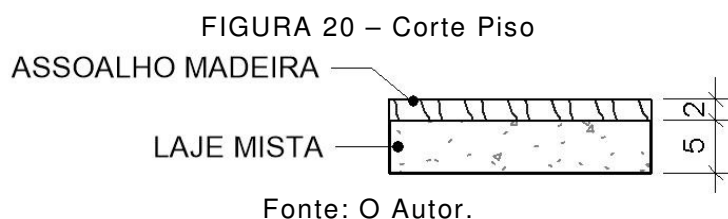
Fonte: O Autor

A opção pelo tijolo maciço deu-se devido a se tratar de um material comum nas construções brasileiras, a cerâmica, porém sem a variável da câmara de ar, existente nos tijolos de 6 furos, com medida de 9x14x19cm.

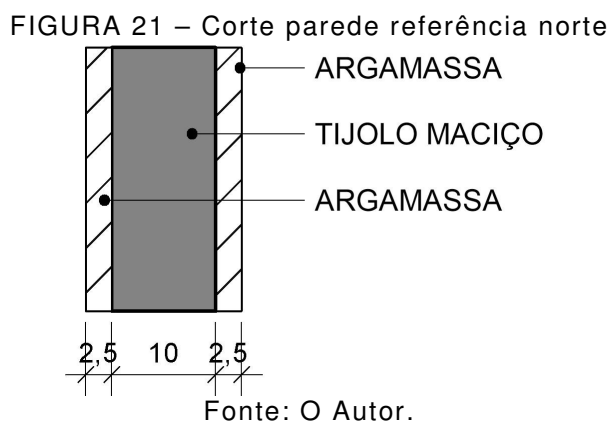
O forro é formado por duas camadas, argamassa de 2,5cm de espessura e laje mista de 5cm (FIGURA 19).



O piso internamente é assoalho de madeira de 2cm, e laje mista na face exterior de 5cm (FIGURA 20).



A parede externa do modelo referencial contém três camadas, sendo duas de argamassa de 2,5cm de espessura externamente a parede e uma camada interna de 10cm de tijolo maciço (FIGURA 21).



Para a janela existente na parede norte foi considerado vidro de 6mm de espessura.

Para que os resultados gerados pelo algoritmo sejam de fato uma simulação aproximada da realidade, os materiais considerados devem ter suas propriedades físicas, pertinentes aos cálculos realizados, baseadas em estudos prévios confiáveis. Os dados dos materiais do modelo de referência para este estudo foram retirados da norma NBR15.220 (ABNT, 2003). Para os materiais que continham uma faixa de valores na citada norma, utilizou-se a média de tal faixa para entrada no algoritmo de

cálculo desta pesquisa. Os valores utilizados por material estão apresentados abaixo no QUADRO 4.

QUADRO 4 – Propriedades dos Materiais

DESCRIÇÃO	CONDUTIVIDADE (W/mK)	DENSIDADE (kg/m <sup>3</sup> )	CALOR ESPECÍFICO (J/kgK)
Argamassa	1,15	2000	1000
Tijolo Maciço	0,90	1300	920
Laje Mista	1,05	1087	920
Assoalho Madeira	0,15	450	1340
Vidro	1,00	2500	840

Fonte: O Autor

#### 4.5 PCM

Para esta pesquisa foi escolhido um PCM do tipo orgânico *bio-based* (com fonte biológica e renovável). Os PCMs de fontes biológicas são aglomerados de ácidos graxos feitos de matéria-prima subutilizada de óleo de soja, óleo de coco, azeite de dendê (*palm oils*) e sebo bovino. Se comparados às parafinas (também PCM orgânico) são significativamente menos inflamáveis e é esperado que se mantivesse estabilizado por milhares de ciclos de mudança de fase, sem risco de oxidação. Estes materiais podem ter ponto de fusão entre -22,7°C e 78,33°C, o que possibilita aplicação em diversas áreas e regiões climáticas (JEONG et al., 2013 e KOSNY et al., 2012).

O material escolhido aparece na pesquisa de Kong et al. (2013) e trata-se de uma mistura de dois compostos de fontes renováveis, o ácido cáprico e o álcool dodecílico, o primeiro de origem animal e o segundo vegetal. A mistura dos dois compostos foi proposta pelos pesquisadores para conter o efeito de *supercooling* e para ajustar a temperatura de fusão/solidificação. O composto final foi analisado em um DSC (*differential scanning calorimetry*) de maneira a analisar e levantar suas propriedades de transferência de calor.

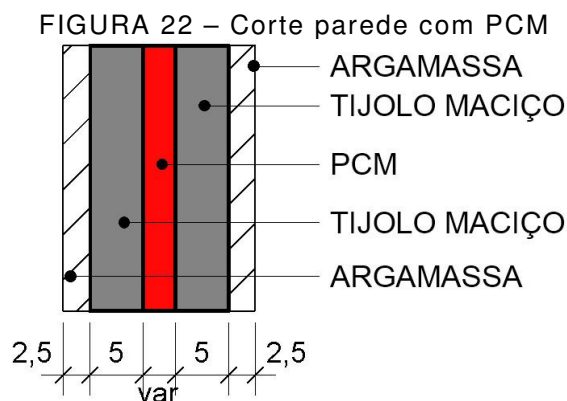
As propriedades levantadas pela pesquisa do material com mudança de fase utilizado estão no QUADRO 5.

QUADRO 5 – Propriedades do material com mudança de fase

PCM – Ácido Cáprico e Álcool Dodecílico	
Condutividade Térmica [W/(m.K)] - Sólido	0,12
Condutividade Térmica [W/(m.K)] - Líquido	0,20
Densidade [kg/m³] - Sólido	784
Densidade [kg/m³] - Líquido	817
Calor Específico [J/(kg.K)] - Sólido	1890
Calor Específico [J/(kg.K)] - Líquido	2080
Entalpia de Fusão [J/kg]	126900

Fonte: O Autor.

O PCM foi utilizado como a camada mediana da parede norte do modelo físico (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**). A espessura foi determinada de maneira a maximizar a utilização do seu potencial de armazenar energia como entalpia de liquefação, o que representa o princípio básico da utilização desses materiais,  $m_i = \rho_i A \delta_i$ .



Fonte: O Autor.

#### 4.6 CASOS SIMULADOS

Apresentados então o modelo de referência, o material PCM utilizado e a faixa de conforto definida, neste item serão discriminados os casos a serem simulados.

A partir do modelo físico de referência, duas variáveis foram alteradas: espessura da camada com PCM e a cidade no qual o modelo foi simulado.

Alteração das camadas da parede norte:

- Caso 1 (Referência): Sem camada PCM;
- Caso 2: Camada PCM com espessura calculada para maximizar armazenamento de energia durante a liquefação.

O algoritmo trabalha, basicamente, inserindo um modelo físico pré-determinado em um ambiente com diversas variáveis que são alteradas hora a hora. Esse ambiente e essas variáveis chamamos de banco de dados climáticos. Os bancos de dados climáticos são uma sequência de dados que representam as alterações climáticas de nosso ambiente simulado. Tendo sua origem em dados históricos, e levando em consideração que a previsão do tempo é um sistema caótico, os dados representados são uma estimativa de horas, dias, meses e ano médio. Se considerado for um ano extremamente frio, as estimativas de consumo energético para aquecimento provavelmente serão majoradas, se considerado um ano com temperaturas acima da média, o consumo com resfriamento será maior. Portanto o cuidado com o banco de dados e a leitura de suas entradas devem ser criteriosas.

A dimensão do território brasileiro gera diversas diferenças climáticas internamente. Existem cidades com maior amplitude térmica, mais e menos úmidas, com maiores picos de temperaturas e também com picos negativos, como é o caso da região serrana de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Esses diferentes cenários não permitem uma conclusão prévia da adequação ou não de uma ou outra estratégia projetual para otimizar o conforto térmico interno. Há de fato a necessidade de estudo para cada uma destas “regiões climáticas”. No Brasil a NBR 15.220 (ABNT, 2003) definiu 8 zonas bioclimáticas para toda a extensão do território. Apesar de intensamente discutidas a NBR em questão já sugere estratégias de projeto para as edificações em cada uma destas zonas. Este trabalho então, utilizará os dados de cidades das 8 zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15.220 para a simulação do modelo físico (QUADRO 6).

QUADRO 6 – Definição cidades por zona bioclimática

<b>ZONA BIOCLIMÁTICA</b>	<b>CIDADE</b>
ZONA 1	Curitiba, Paraná
ZONA 2	Santa Maria, Rio Grande do Sul
ZONA 3	São Paulo, São Paulo
ZONA 4	Brasília, Distrito Federal
ZONA 5	Vitória da Conquista, Bahia
ZONA 6	Campo Grande, Mato Grosso do Sul
ZONA 7	Cuiabá, Mato Grosso
ZONA 8	Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

Fonte: O Autor.

Considerando a combinação de todos os cenários, tem-se no total 16 simulações a serem analisadas futuramente.

#### 4.7 DADOS CLIMÁTICOS

As bases de dados utilizadas para os cálculos nesta pesquisa tratam-se de arquivos de textos, com os valores espaçados por tabulação, como entrada de dados climáticos para a simulação do modelo físico. Neste arquivo encontramos os valores de temperatura de bulbo seco do ar externo, umidade relativa do ar externo, velocidade do vento e valores de radiação direta, além de valores de geração de calor interno. Para todos esses dados possuem 8761 linhas que refletem todas as horas de um ano inteiro. Definido o padrão de arquivo foi possível criar os bancos de dados para cada uma das cidades estudadas.

Foram utilizados os arquivos de dados disponibilizados no site do Energyplus Energy Simulation Software (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2016) e pelo trabalho de Roriz (2012) junto ao grupo de trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética em Edificações da ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

Deles foram retirados os valores horários de temperatura, umidade relativa, radiação direta e velocidade do vento, e utilizados no banco de dados do algoritmo. A utilização do banco de dados no formato para o software EnergyPlus se deu devido ao amplo uso de sua base de dados em pesquisas.

Os arquivos utilizados para produção da base de dados de cada uma das oito cidades analisadas nesta pesquisa encontram-se no QUADRO 7.

QUADRO 7 – Arquivos de dados climáticos

<b>CIDADE</b>	<b>ARQUIVO</b>
Curitiba	BRA_Curitiba-Afonso.Pen.838400_SWERA
Santa Maria	BRA_Santa.Maria.839360_SWERA
São Paulo	BRA_Sao.Paulo-Congonhas.837800_SWERA
Brasília	BRA_Brasilia.833780_SWERA
Vitória da Conquista	BA_Vitoria_da_Conquista (ANTAC)
Campo Grande	BRA_Campo.Grande.836120_SWERA
Cuiabá	BRA_Cuiaba-Marechal.Ron.833620_SWERA
Rio de Janeiro	BRA_Rio.de.Janeiro-Santos.Dumont.837550_SWERA

Fonte: O Autor

## 5. ALGORITMO

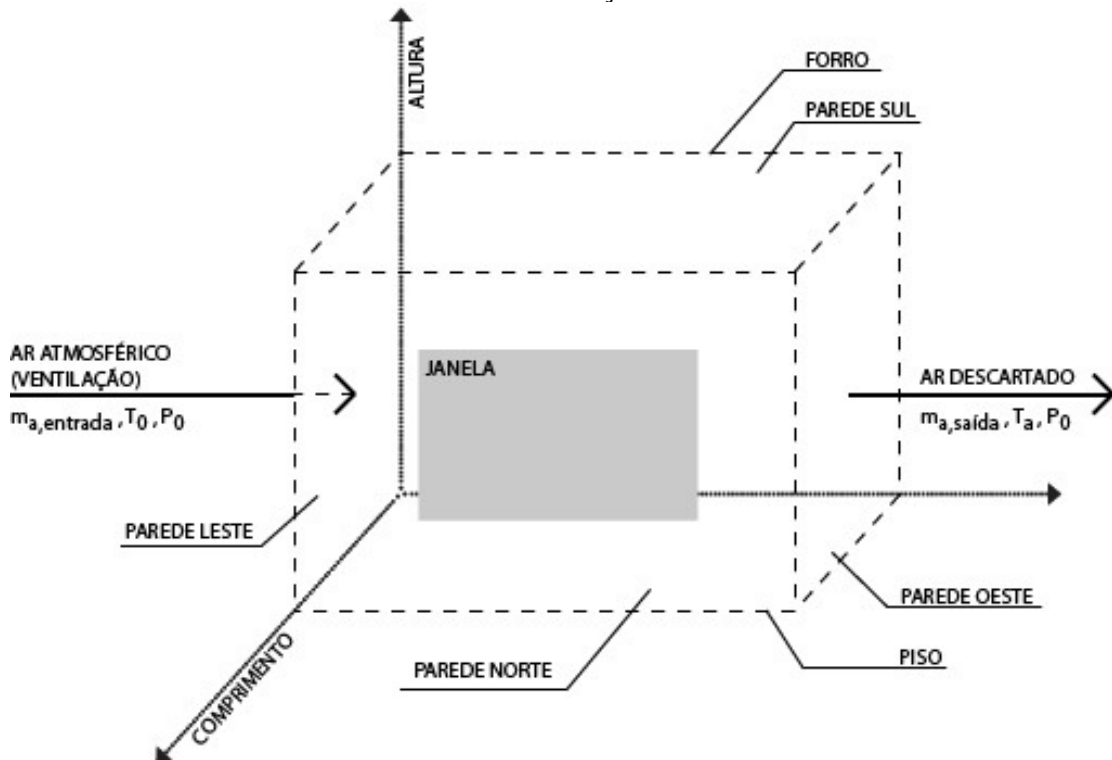
Neste capítulo serão apresentados as equações utilizadas para desenvolvimento do modelo matemático e as hipóteses utilizadas.

### 5.1 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático utilizado para as simulações deste trabalho baseia-se nas leis de conservação de massa de ar seco e vapor d'água, e na lei de conservação da energia num volume de controle representado a sala comercial.

O modelo utilizado considera que todos os pontos da massa de ar interna têm a mesma temperatura e umidade relativa (modelo *well stirred tank*). É importante salientar que não há, no modelo, variação de pressão, mantendo-se sempre estável durante todo o cálculo. Também não há troca de massa entre as paredes, piso e teto. A massa de ar seco e o vapor d'água foram considerados gases perfeitos. E a transferência de calor se dá apenas perpendicularmente às faces das paredes (FIGURA 23).

FIGURA 23 – Resumo interações do modelo físico.



Fonte: O Autor.

O problema que o algoritmo deve solucionar é estimar matematicamente os valores de temperatura, umidade relativa e carga térmica necessária para a manutenção do conforto interno do ambiente simulado.

Este modelo foi escrito em linguagem Fortran, dando continuidade ao trabalho já realizado pelo professor George Stanescu, orientador desta pesquisa.

## 5.2 EQUAÇÕES

Baseando-se nas hipóteses apresentadas no item 5.1, temos as equações de conservação de massa, para ar seco (1) e vapor d'água (2), e conservação de energia (3) em um volume de controle.

$$\frac{dm_a}{dt} = \sum_{\text{entradas}} \dot{m}_{a,e} - \sum_{\text{saídas}} \dot{m}_{a,s} = \dot{m}_{a,e} - \dot{m}_{a,s} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dm_w}{dt} &= \sum_{\text{entradas}} \dot{m}_{w,e} + \dot{m}_{w,ger} - \sum_{\text{saídas}} \dot{m}_{w,s} \\ &= (\dot{m}_{w,e} + \dot{m}_{w,ger}) - (\dot{m}_{w,s,vap} + \dot{m}_{w,s,liq}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{dU}{dt} = \sum_j \dot{Q}_j - \sum_k \dot{W}_k + \sum_{\text{entradas}} \dot{m}_e h_e + \dot{m}_{w,ger} h_{w,ger} - \sum_{\text{saídas}} \dot{m}_s h_s \quad (3)$$

$m_a$  – Massa de ar seco

$m_w$  – Massa vapor d'água

$U$  – Energia interna total

$\dot{Q}$  – Fluxo térmico

$\dot{W}$  – Potência mecânica

$h$  - Entalpia específica

$t$  – Tempo

Devido ao fato do volume de controle considerado ter apenas uma entrada e uma saída para troca de ar, então temos que os somatórios da Eq. (1) e da Eq. (2) tornam-se apenas um fluxo cada.



Os termos  $\dot{m}_{w,ger}$  e  $\dot{m}_{w,s,liq}$  constantes na Eq. (2) são o vapor d'água gerado pela respiração humana, assim como pela transpiração, ou outros processos que possam ocorrer, e pelo processo de liquefação que possa ocorrer em temperaturas abaixo do ponto de orvalho.

Como o modelo trata de gás perfeito tem-se então tem-se

$$\dot{m}_{a,e} = P_{a,0}V_{vent}/R_aT_0 \quad (4)$$

e

$$\dot{m}_{w,e} = \frac{P_{w,0}V_{vent}}{R_wT_0} \quad (5)$$

$m_a$  – Massa de ar seco

$m_w$  – Massa de vapor d'água

$P_{a,0}$  – Pressão parcial do ar seco

$P_{w,0}$  – Pressão parcial do vapor d'água

$V_{vent}$  – Vazão mássica de ar

$R$  – Constante universal dos gases perfeitos

$T_0$  – Temperatura externa

Calculam-se as pressões parciais através do modelo de Dalton considerando  $P_0$  pressão constante atmosférica.

$$P_{w,0} = \varphi_0 P_{sat}(T_0) \quad (6)$$

$$P_a = P_0 - P_{w,0} \quad (7)$$

$P_0$  – Pressão atmosférica

$\varphi_0$  – Umidade relativa do ar externo

Do modelo de Dalton para gases perfeitos e das Eqs. (1) e (2) temos:

$$\frac{dm_a}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{P_a LCA}{R_a T_a} \right) = \frac{LCA}{R_a T_a} \left( \frac{dP_a}{dt} - \frac{P_a}{T_a} \frac{dT_a}{dt} \right) \quad (8)$$

E

$$\frac{dm_w}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{P_w LCA}{R_w T_w} \right) = \frac{LCA}{R_w T_w} \left( \frac{dP_w}{dt} - \frac{P_w}{T_w} \frac{dT_w}{dt} \right) \quad (9)$$

$L$  – Largura volume de controle

$C$  – Comprimento volume de controle

$A$  – Altura volume de controle

$T_a$  – Temperatura ar seco

$T_w$  – Temperatura vapor d'água

Sendo em (8) e (9)  $L$  a largura,  $C$  o comprimento e  $A$  a altura da sala estudada. Para essas equações tem-se ainda  $T_a = T_w$  temperatura de ar misturado e,  $R_a$  e  $R_w$  constantes de ar seco e vapor d'água.

Portanto seguem as equações das massas que deixam o volume de controle

$$\dot{m}_{a,s} = \frac{P_{a,s} V_{vent}}{R_a T_0} - \frac{dm_a}{dt} \quad (10)$$

e sendo  $\dot{m}_{w,s,vap} = \omega \dot{m}_{a,s}$  tem-se

$$\dot{m}_{w,s,liq} = \frac{P_{w,0} V_{vent}}{R_w T_0} + \dot{m}_{w,ger} - \omega \dot{m}_{a,s} - \left( \frac{dm_w}{dt} \right) \quad (11)$$

$\omega$  – Umidade específica

$\dot{m}_{w,s,liq}$  – Massa de vapor d'água liquefeito

$\dot{m}_{w,ger}$  – Massa de vapor d'água gerada no volume de controle

Sob a conservação de energia tem-se,  $U = U_a + U_w$ , para a Eq. (3) será utilizado  $U = m \cdot u$ , no caso  $U_a = m_a u_a$  e  $U_w = m_w u_w$ , para ar seco e vapor d'água respectivamente. Segue

$$\frac{d(m_a u_a + m_w u_w)}{dt} = m_a \frac{du_a}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} + u_a \frac{dm_a}{dt} + m_w \frac{du_w}{dT_a} \frac{dT_a}{dt} + u_w \frac{dm_w}{dt} \quad (12)$$

$u_a$  – Energia interna específica do ar seco

$u_w$  – Energia interna específica do vapor d'água

Sendo  $m$  as massas de ar seco e vapor d'água dentro do volume de controle e  $u$  suas energias internas específicas.

Calcula-se em seguida a derivada da temperatura  $dT_a/dt$  substituindo a Eq. (12) na Eq. (3), assumindo não haver interação mecânica entre o volume de controle e o seu redor.

$$\begin{aligned} \frac{dT_a}{dt} = & \frac{-u_a \frac{dm_a}{dt} - u_w \frac{dm_w}{dt} + \sum_j \dot{Q}_j - \sum_k \dot{W}_k}{m_a \left( \frac{du_a}{dT_a} \right) + m_w \left( \frac{du_w}{dT_a} \right)} \\ & + \frac{\sum_{\text{entradas}} \dot{m}_e h_e + \dot{m}_{w,ger} h_{w,ger} - \sum_{\text{saídas}} \dot{m}_s h_s}{m_a (du_a/dT_a) + m_w (du_w/dT_a)} \end{aligned} \quad (13)$$

Os termos  $\dot{Q}_j$  na Eq. (13) referem-se a todas as interações de trocas de energia, por radiação e convecção, que interferem no volume de controle. Entre elas estão a radiação solar  $\dot{Q}_{sun}$ , geração interna de calor  $\dot{Q}_{in}$ , as trocas de calor entre piso  $\dot{Q}_F^{c,r}$ , teto  $\dot{Q}_C^{c,r}$ , paredes ( $\dot{Q}_N^{c,r}$ ,  $\dot{Q}_E^{c,r}$ ,  $\dot{Q}_O^{c,r}$ ,  $\dot{Q}_S^{c,r}$ ) e janela  $\dot{Q}_{win}^{c,r}$ .

Para descrever as interações entre o volume de controle e seu envelope utilizou-se  $\dot{Q}_j^{c,r} = q_{j,i}^{c,r} A_j$ , onde  $q_{j,i}^c$  refere-se ao fluxo de calor unitário na camada interna das faces e Eq. (14) e ao fluxo unitário por radiação Eq. (15).

$$q_{j,i}^c \cong \frac{T_{j,i} - T_a}{1/h_{j,i} + \delta_{j,i}/(2\lambda_{j,i})} \quad (14)$$

$$q_{j,i}^r \cong C_{oef}^{rad} \sigma (\alpha_a T_{j,i}^4 - \varepsilon_a T_a^4) \quad (15)$$

$h_i$  – Coeficiente de convecção na superfície interna

$\delta_i$  – Espessura da camada

$\lambda_i$  – Condutividade térmica

$\alpha_a$  – Absortividade de vapor d'água

$\varepsilon_a$  – Emissividade

$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  – Constante de Stefan-Boltzmann

$T_i$  – Temperatura no meio da camada

Sendo  $j \in \{win, N, S, E, O, C, F\}$  e  $A_j \in \{A_{win}, AL - A_{win}, AL, AC, AC, LC, LC\}$  respectivamente.

Além destas equações mais algumas condições são definidas. Tendo as paredes sul, leste e oeste, o piso e o teto, no seu eixo central uma superfície adiabática a equação 16 é estabelecida representando a lei de conservação de energia aplicada a camada interna da parede.

$$q_{j,i} + q_{j,m} + \delta_{j,i} \rho_{j,i} c_{j,i} \frac{dT_{j,i}}{dt} = 0 \quad (16)$$

Com a lei de conservação de energia aplicada a metade interna da camada do meio da parede, equação 17.

$$q_{j,m} - \frac{1}{2} \delta_{j,m} \rho_{j,m} c_{j,m} \frac{dT_{j,m}}{dt} = 0 \quad (17)$$

Logo,

$$q_{j,m} = \frac{T_{j,i} - T_{j,m}}{\delta_{j,i}/(2\lambda_{j,i}) + \delta_{j,m}/(2\lambda_{j,m})} \quad (18)$$

$\delta_m$  – Espessura do material da camada

$\lambda_m$  – Condutividade térmica do material da camada média

$\rho_m$  – Massa específica do material da camada média

$c_m$  – Calor específico do material da camada média

$T_m$  – Temperatura da camada média

Em relação à parede norte, para determinar-se possíveis ganhos e perdas devido a radiação ou diferença de temperatura entre a superfície externa da parede e o ar atmosférico  $T_0$ , aplica-se a lei de conservação de energia para todas as camadas da mesma (FIGURA 24 e FIGURA 25). Como o algoritmo possui 5 camadas para a parede norte,  $N_i$ ,  $N_{m1}$ ,  $N_{m2}$ ,  $N_{m3}$  e  $N_{m3}$ , tem-se 5 equações, Eq. (19), (20), (21), (22) e (23) respectivamente.

FIGURA 24 – Esquema de transmissão de energia através da parede norte – caso referência.

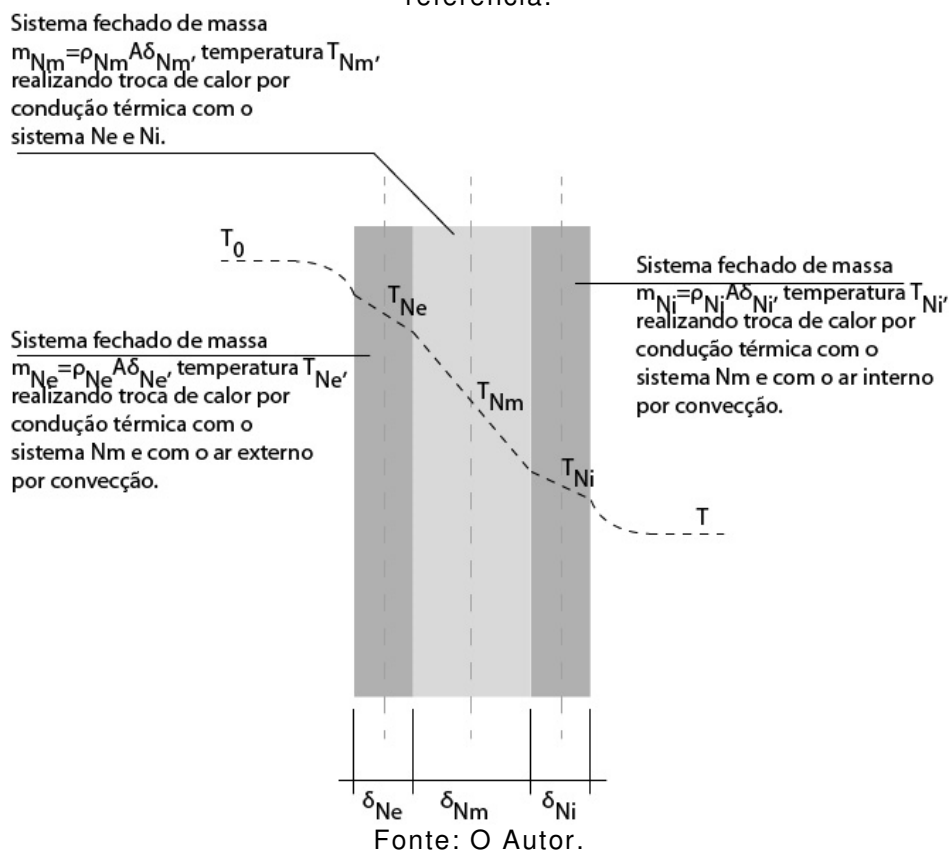
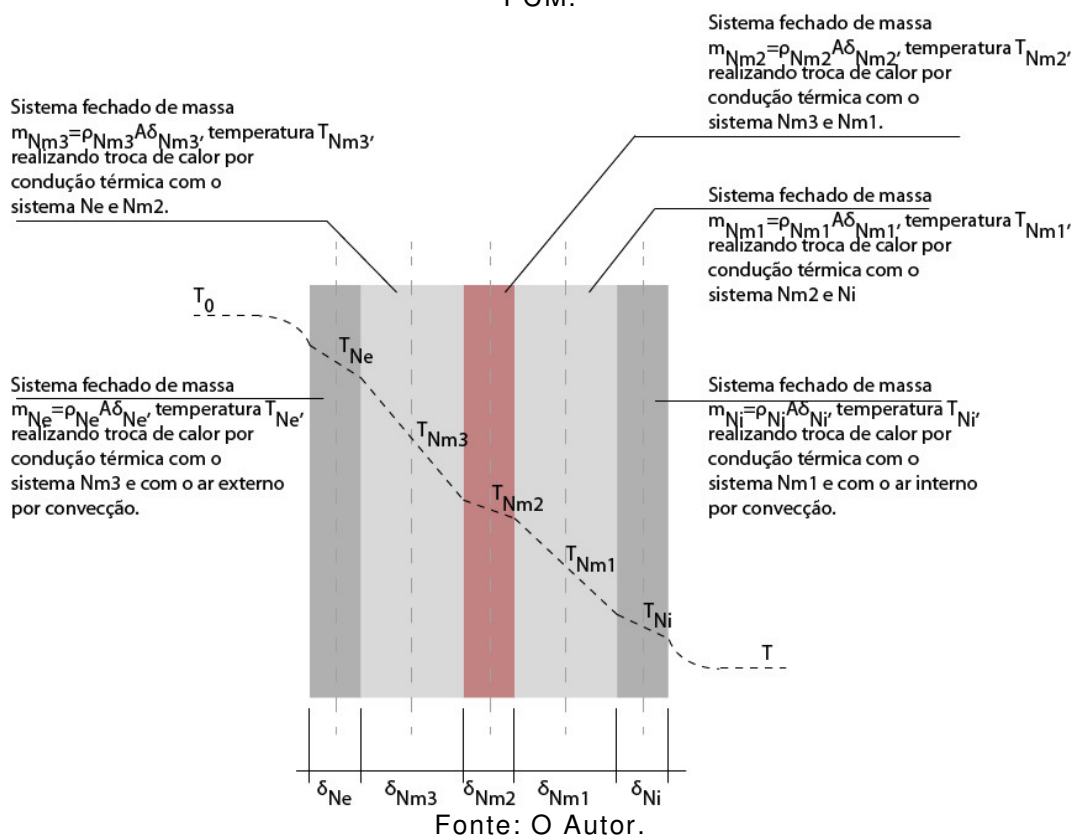


FIGURA 25 - Esquema de transmissão de energia através da parede norte – caso com PCM.



$$q_{N,i} + q_{N,m1} + \delta_{N,i}\rho_{N,i}c_{N,i} \frac{dT_{N,i}}{dt} = 0 \quad (19)$$

$$-q_{N,m1} + q_{N,m2} + \delta_{N,m1}\rho_{N,m1}c_{N,m1} \frac{dT_{N,m1}}{dt} = 0 \quad (20)$$

$$-q_{N,m2} + q_{N,m3} + \delta_{N,m2}\rho_{N,m2}c_{N,m2} \frac{dT_{N,m2}}{dt} = 0 \quad (21)$$

$$-q_{N,m3} + q_{N,e} + \delta_{N,m3}\rho_{N,m3}c_{N,m3} \frac{dT_{N,m3}}{dt} = 0 \quad (22)$$

$$q_{sun} - q_{N,e} + \frac{T_{N,e} - T_0}{\frac{1}{h_{N,e}} + \frac{\delta_{N,e}}{2\lambda_{N,e}}} + \delta_{N,e}\rho_{N,e}c_{N,e} \frac{dT_{N,e}}{dt} = 0 \quad (23)$$

Logo, podemos escrever os fluxos unitários  $q_{N,i}$ ,  $q_{N,m1}$ ,  $q_{N,m2}$ ,  $q_{N,m3}$  e  $q_{N,e}$  das seguintes formas respectivamente:

$$q_{N,i} = \frac{T_{N,i} - T_{N,m1}}{\delta_{N,i}/(2\lambda_{N,i}) + \delta_{N,m1}/(2\lambda_{N,m1})} \quad (24)$$

$$q_{N,m1} = \frac{T_{N,i} - T_{N,m1}}{\delta_{N,i}/(2\lambda_{N,i}) + \delta_{N,m1}/(2\delta_{N,m1})} \quad (25)$$

$$q_{N,m2} = \frac{T_{N,m1} - T_{N,m2}}{\delta_{N,m1}/(2\lambda_{N,m1}) + \delta_{N,m2}/(2\delta_{N,m2})} \quad (26)$$

$$q_{N,m3} = \frac{T_{N,m2} - T_{N,m3}}{\delta_{N,m2}/(2\lambda_{N,m2}) + \delta_{N,m3}/(2\delta_{N,m3})} \quad (27)$$

$$q_{N,e} = \frac{T_{N,m3} - T_{N,e}}{\delta_{N,m3}/(2\lambda_{N,m3}) + \delta_{N,e}/(2\delta_{N,e})} \quad (28)$$

O modelo matemático também assume, de maneira a facilitar o esforço computacional, que a radiação solar não influencia na temperatura da janela e a equação (29) de conservação de energia é escrita da seguinte forma.

$$q_{win,i} + q_{win,e} + \delta_{win}\rho_{win}c_{win} \frac{dT_{win,i}}{dt} = 0 \quad (29)$$

Baseando-se na Lei de Dalton para gases perfeitos,  $dP_a = -dP_w$  e derivando a definição de umidade específica  $\omega = \frac{m_w}{m_a} = 0,622P_w/P_a$  e logo  $dP_w/dt = -dT_a/dt$ .

$$\frac{dP_w}{dt} = -\frac{dP_a}{dt} = \frac{P_a^2}{0,622m_aP_a} \left( \frac{dm_w}{dt} - \omega \frac{dm_a}{dt} \right) \quad (30)$$

As equações 8, 9 ,13,16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 29, 30 fazem parte de um sistema de equações diferenciais ordinárias solucionadas pelo algoritmo. Com o mesmo pode-se determinar as variações de massa de ar seco e vapor d'água, temperatura e pressão parcial, e variação da temperatura das camadas da envoltória do volume de controle.

Após esta etapa iniciou-se a implementação do cálculo da carga térmica necessária para manutenção da temperatura interna do volume de controle dentro de uma faixa de temperatura definida, no caso a faixa de conforto térmico determinada.

O algoritmo calcula por padrão  $T$ , temperatura interna do volume de controle, no momento ( $n$ ) com base nas variáveis do momento ( $n - 1$ ). Calculado  $T_n$  um teste condicional é realizado, se:

$$T_n \geq T_{maximo} \quad (31)$$

$$T_n \leq T_{minimo} \quad (32)$$

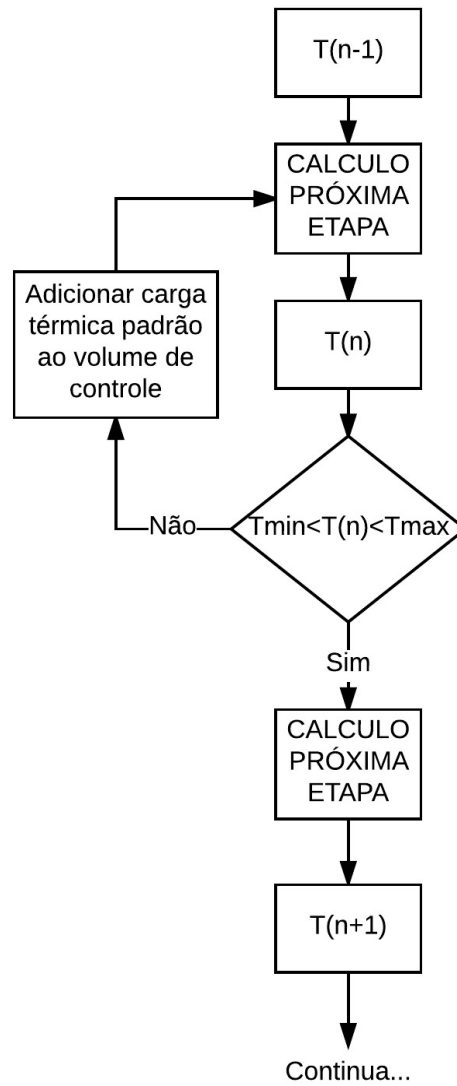
$T_{maximo}$  - *Setpoint* de acionamento do resfriamento

$T_{minimo}$  - *Setpoint* de acionamento do aquecimento

Então uma carga extra de resfriamento ou aquecimento, respectivamente, padrão é adicionada a equação (13) e o algoritmo volta a calcular  $T_n$  novamente.

O valor da temperatura interna então é testado mais uma vez e na situação do não cumprimento da condicionalidade, as cargas extras são adicionadas cumulativamente até o momento em que  $T_n$  volte a estar na faixa determinada,  $T_{minimo} < T_n < T_{maximo}$ . Um resumo do funcionamento do sistema é apresentado no fluxograma abaixo, FIGURA 26.

FIGURA 26 – Fluxograma controle interno de temperatura.



Fonte: O Autor.

Desta maneira é calculada então a quantidade de energia térmica para a manutenção da temperatura de conforto interno. As expressões que representam o cálculo para aquecimento ( $\tilde{Q}_{AQ}$ ) e resfriamento ( $\tilde{Q}_R$ ) são as equações 33 e 34 respectivamente:

$$\tilde{Q}_{AQ} = \frac{1}{2A} \int_0^{8760} \left(1 - \frac{T_N - T_{int}}{|T_N - T_{int}|}\right) \frac{|T_N - T_{int}|}{0,5\delta_N/\lambda_N + 1/h_{int}} dt \quad (33)$$



$$\tilde{Q}_R = \frac{1}{2A} \int_0^{8760} \left(1 + \frac{T_N - T_{int}}{|T_N - T_{int}|}\right) \frac{|T_N - T_{int}|}{0,5\delta_N/\lambda_N + 1/h_{int}} dt \quad (34)$$

$\tilde{Q}_{AQ}$  – Energia térmica anual para aquecimento da sala.

$\tilde{Q}_R$  – Energia térmica anual para resfriamento da sala.

$T_N$  – Temperatura da camada interna da parede norte.

$T_{int}$  – Temperatura interna do volume de controle.

$A$  – Área do volume de controle

A última etapa do desenvolvimento do algoritmo refere-se à implementação do uso de materiais com mudança de fase. Quando uma das camadas da envoltória é um material com mudança de fase algumas considerações devem ser feitas.

O PCM, dentro da faixa de temperatura que este trabalho abrange, possui dois regimes de funcionamento. O primeiro quando  $T_{camada} \neq T_{PCM}$ , sendo  $T_{camada}$  a temperatura do material e  $T_{PCM}$  a temperatura de fusão do mesmo, e o segundo quando  $T_{camada} = T_{PCM}$ . Enquanto o primeiro caso se verifica uma equação do tipo (35) é utilizada para o cálculo da variação da temperatura.

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{1}{\delta_j \rho_j c_j} \left( \frac{T_{j-1} - T_j}{\delta_{j-1}/(2\lambda_{j-1}) + \delta_j/(2\lambda_j)} - \frac{T_j - T_{j+1}}{\delta_j/(2\lambda_j) + \delta_{j+1}/(2\lambda_{j+1})} \right) \quad (35)$$

$(2 \leq j \leq N - 1)$

O segundo caso acontece quando a camada sólida é aquecida até  $T_{PCM}$  e a fase de liquefação acontece gradualmente, ou quando a camada está líquida e é resfriada até a mesma temperatura de fusão e acontece a solidificação gradual da massa do material. Em ambos os casos, no modelo matemático, durante os processos de mudança de fase a temperatura da camada PCM permanece estável em  $T_{PCM}$  com os fluxos térmicos sendo calculado pela equação (36).

$$\frac{d\tilde{m}_\ell}{dt} = \frac{1}{\Delta h_{s\ell}} \left( \frac{T_{j-1} - T_{PCM}}{\delta_{j-1}/(2\lambda_{j-1}) + \delta_j/(2\lambda_j)} - \frac{T_{PCM} - T_{j+1}}{\delta_{PCM}/(2\lambda_{PCM}) + \delta_{j+1}/(2\lambda_{j+1})} \right) \quad (36)$$

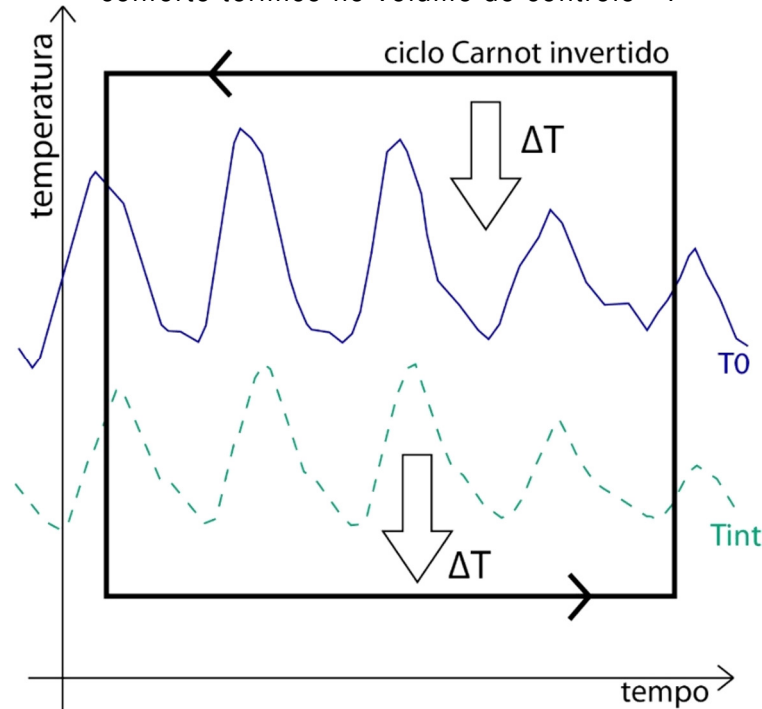
$\tilde{m}_\ell$  - Massa material PCM liquefeita

$h_{s\ell}$  - Entalpia material com mudança de fase

Com as energias térmicas necessárias para a manutenção da temperatura de conforto interna,  $\tilde{Q}_{AQ}$  e  $\tilde{Q}_R$ , três estratégias de cálculo do consumo estimado de energia para geração destas foram utilizadas.

A primeira trata-se da geração de energia através da utilização de equipamentos de aquecimento ou resfriamento, bomba de calor e refrigeração baseado em um ciclo Carnot invertido respectivamente (FIGURA 27). A estimativa de consumo para este caso foi calculada por  $EECA = (\tilde{Q}_{AQ} + \tilde{Q}_R)/COP$ , sendo  $COP$  o coeficiente de performance dos equipamentos.

FIGURA 27 – Estratégia de cálculo do consumo energético para manutenção do conforto térmico no volume de controle - I

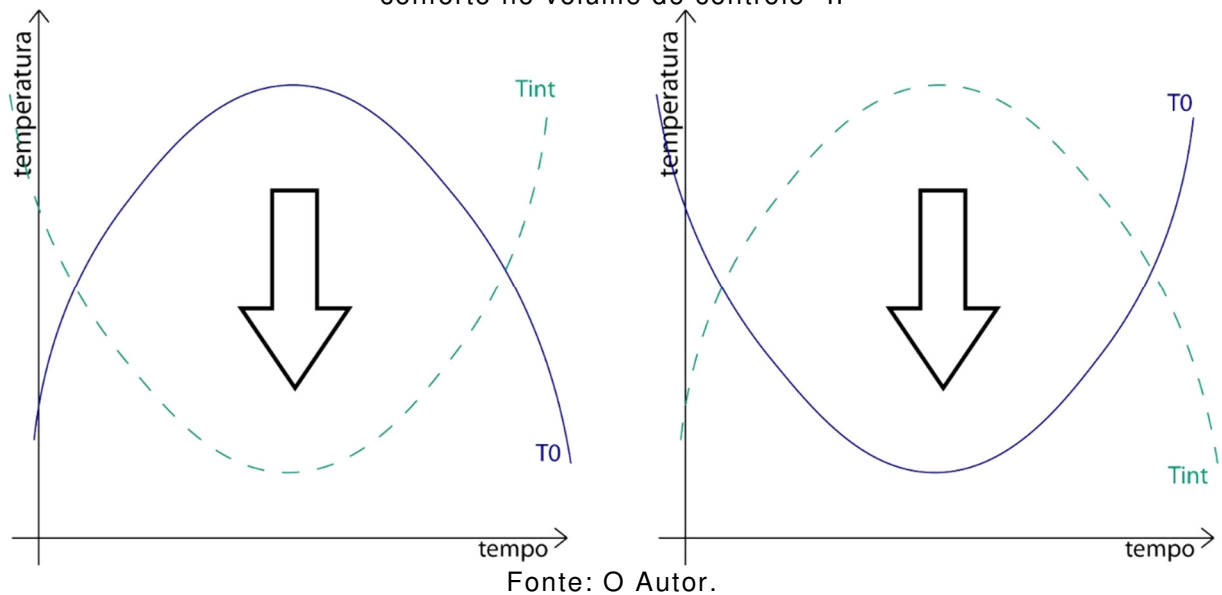


Fonte: O Autor.

O segundo caso leva em consideração uma estratégia de controle térmico que por muitos anos foi a única, antes da utilização em massa de condicionadores de ar. O uso da ventilação como fator ativo do controle térmico pode gerar resultados de redução de consumo significativos. Neste trabalho utilizou-se a ventilação como uma otimização do sistema original. A FIGURA 28 apresenta duas possibilidades de utilização da diferença de temperatura entre o ar externo e interno do volume de controle, onde  $T_0 > T_{int}$  ou  $T_0 < T_{int}$ , havendo potencial de aquecimento ou resfriamento do ambiente interno por meio desse  $\Delta T$ . A estimativa deste consumo foi calculada por  $EECA_{mín} = (\tilde{Q}_{AQ,mín} + \tilde{Q}_{R,mín})/COP$ , onde  $\tilde{Q}_{AQ,mín}$  e  $\tilde{Q}_{R,mín}$  representam

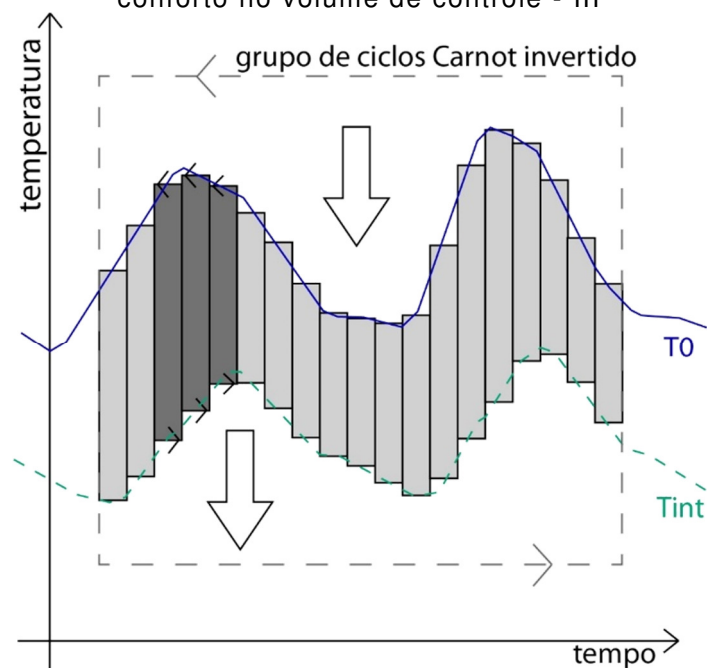
a quantidade de energia térmica necessária para aquecimento e resfriamento, respectivamente. Quando não há possibilidade da utilização da ventilação para tal, ou seja, sendo  $\Delta T$  entre a temperatura externa e interna não favorável a uma troca de calor que auxilie à manutenção da faixa de temperatura de conforto, é então ativado um ciclo de Carnot invertido com o na estratégia 1.

FIGURA 28 - Estratégia de cálculo do consumo energético para manutenção do conforto no volume de controle -II



A terceira estimativa de consumo tem como base os últimos dois casos apresentados. Sendo a ventilação o meio de resfriamento/aquecimento do volume de controle inicial, não sendo atendida a demanda de carga térmica para manutenção da temperatura interna, utiliza-se um agrupamento de ciclos Carnot em espaços de tempo infinitesimais (FIGURA 29), ou seja, sistemas completamente otimizados (menores valores possíveis de  $\Delta T$ ) para o menor espaço de tempo. A soma total será considerada  $EEAC_{mín,teórico}$ .

FIGURA 29 - Estratégia de cálculo do consumo energético para manutenção do conforto no volume de controle - III



Fonte: O Autor.

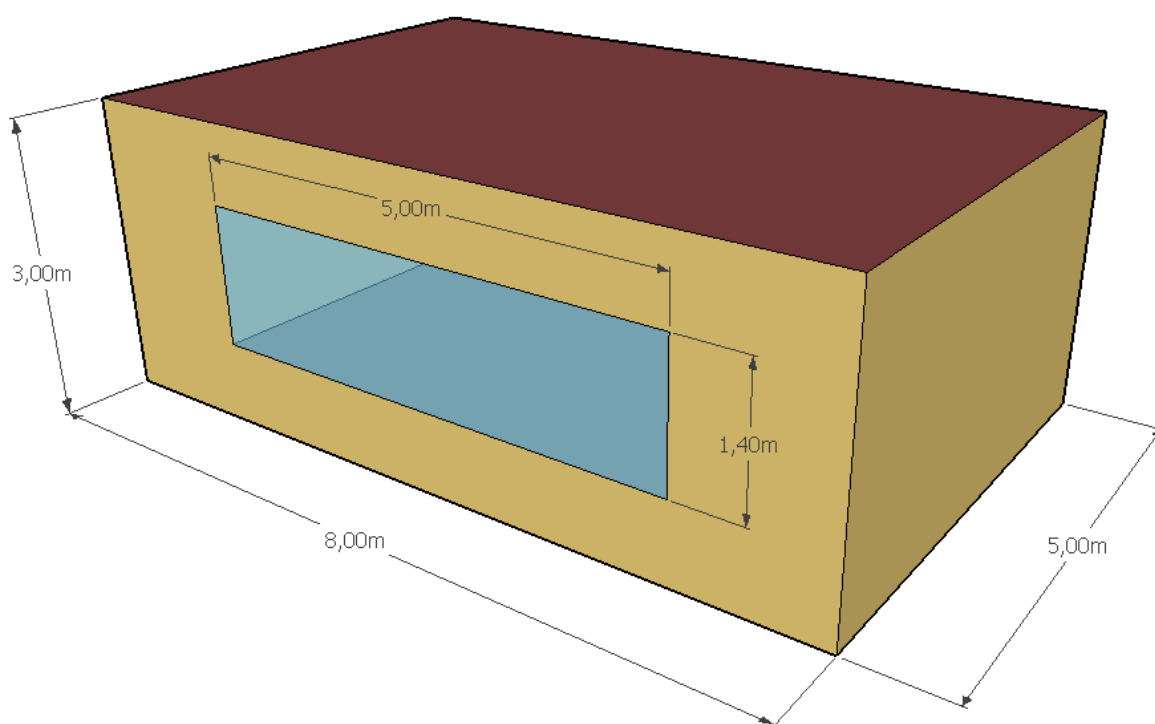
Finalmente com todos os dados e equações inseridos no algoritmo, parte-se então para a fase de simulações. Os resultados serão analisados através dos consumos estimados,  $EEAC$ ,  $EEAC_{mín}$  e  $EEAC_{mín,teórico}$ , além das potências das cargas hora a hora para análise de possíveis picos de energia.

## 6. VALIDAÇÃO

Definido o algoritmo e o modelo físico de única zona a ser simulado, o próximo passo foi validar com outro método já reconhecido pela bibliografia. O software EnergyPlus foi escolhido para serem feitas as comparações.

O modelo físico (FIGURA 30) então foi desenvolvido no formato de entrada do software e a base de dados para a cidade de Curitiba foi a escolha para as condições climáticas na qual o modelo deverá ser submetido.

FIGURA 30 – Modelo de referência simulação EnergyPlus.



Fonte: O Autor.

Feita a modelagem da edificação virtual a ser simulada, foram inseridos os dados de propriedades térmicas necessários para o cálculo feita pelo software (FIGURA 31). O EnergyPlus necessita que sejam definidas as camadas de cada face do modelo e as propriedades físicas de cada uma das camadas (FIGURA 32).

FIGURA 31 – Descrição paredes, forro e piso modelo EnergyPlus.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		PAREDE EXTERNA	FORRO	JANELA	PAREDE INTERNA	PISO
Outside Layer		ARMAMASSA 25mm	ARMAMASSA 25mm	VIDRO 6mm	ARMAMASSA 25mm	MADEIRA 2cm
Layer 2		TIJOLO MACICO	LAJE MISTA 10cm		TIJOLO MACICO	LAJE MISTA 5cm
Layer 3		ARMAMASSA 25mm	ARMAMASSA 25mm		ARMAMASSA 25mm	MADEIRA 2cm

Fonte: O Autor.

FIGURA 32 – Propriedades físicas dos materiais utilizados no EnergyPlus.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		ARMAMASSA 25mm	MADEIRA 2cm	TIJOLO MACICO	LAJE MISTA 10cm	LAJE MISTA 5cm	VIDRO SOLIDO
Roughness		MediumSmooth	VerySmooth	MediumRough	MediumRough	MediumRough	VerySmooth
Thickness	m	0,025	0,02	0,1	0,1	0,05	0,006
Conductivity	W/m-K	1,15	0,15	0,9	1,05	1,05	1
Density	kg/m3	2000	450	1300	1087	1087	2500
Specific Heat	J/kg-K	1000	1340	920	920	920	840
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Visible Absorptance		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

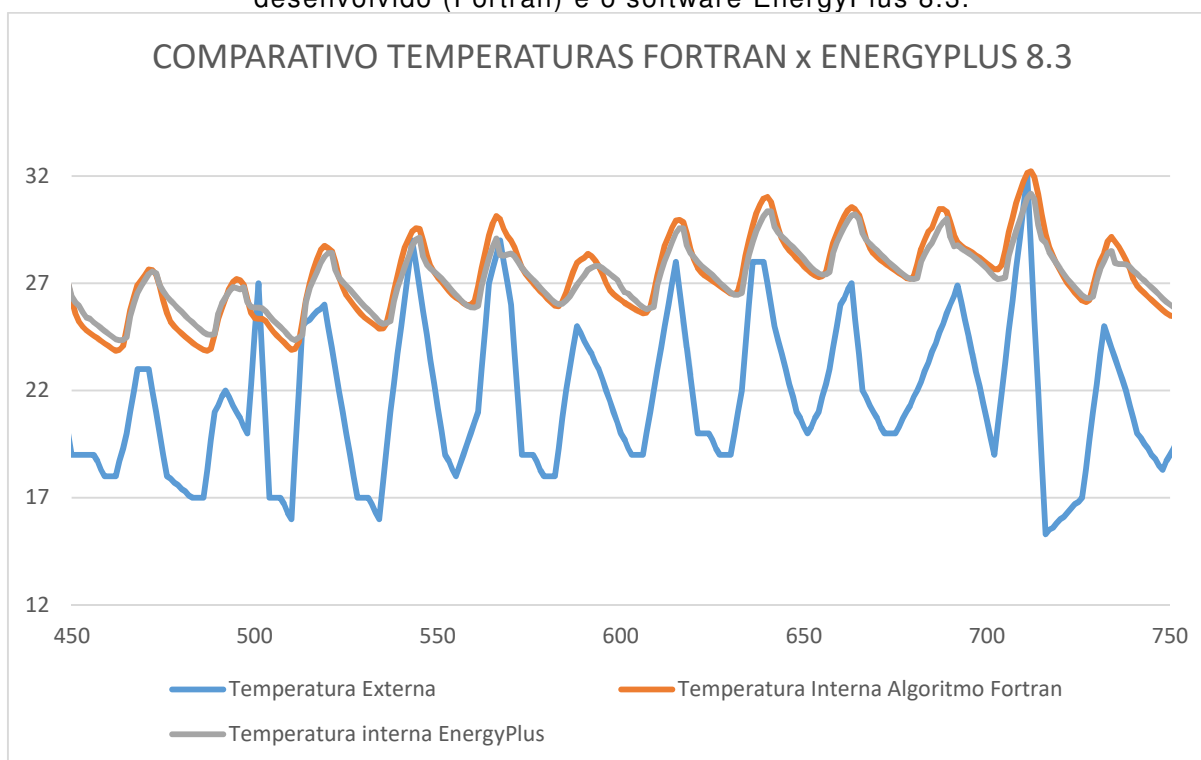
Fonte: O Autor.

Da mesma maneira como fora definido no algoritmo as paredes sul, leste e oeste, assim como forro e piso, foram considerados adiabáticos. E no EnergyPlus também foram configurados de maneira a não receberem ação de vento ou sol.

Também foi definido o horário de funcionamento como o apresentado no capítulo a respeito do modelo físico, influenciando assim as configurações de número de pessoas, ventilação, iluminação e equipamentos.

Realizada a simulação no algoritmo Fortran e no modelo para o Energyplus foram comparadas as temperaturas externa e interna de ambos os modelos na FIGURA 33.

FIGURA 33 – Comparativo 300 horas entre temperaturas simuladas com algoritmo desenvolvido (Fortran) e o software EnergyPlus 8.3.



Fonte: O Autor.

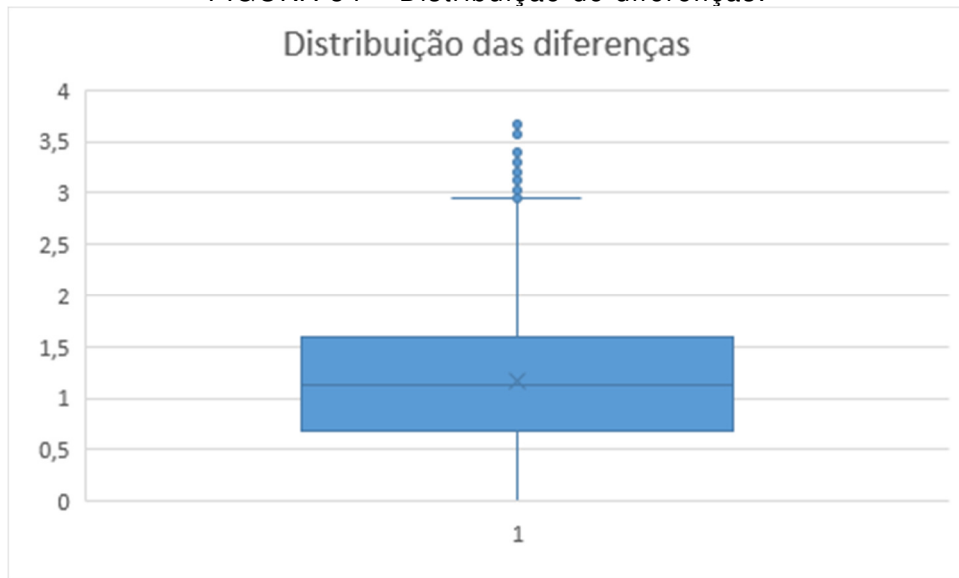
Os erros de diferenças de temperaturas foram calculadas hora a hora como na EQUAÇÃO 37 e representados graficamente na FIGURA 31

$$\varepsilon_i = |T_{i,fortran} - T_{i,EnergyPlus}|$$

$$T_{i,fortran} = \text{Temperatura modelo Fortran}$$

$$T_{i,EnergyPlus} = \text{Temperatura modelo EnergyPlus}$$
(37)

FIGURA 34 – Distribuição de diferenças.



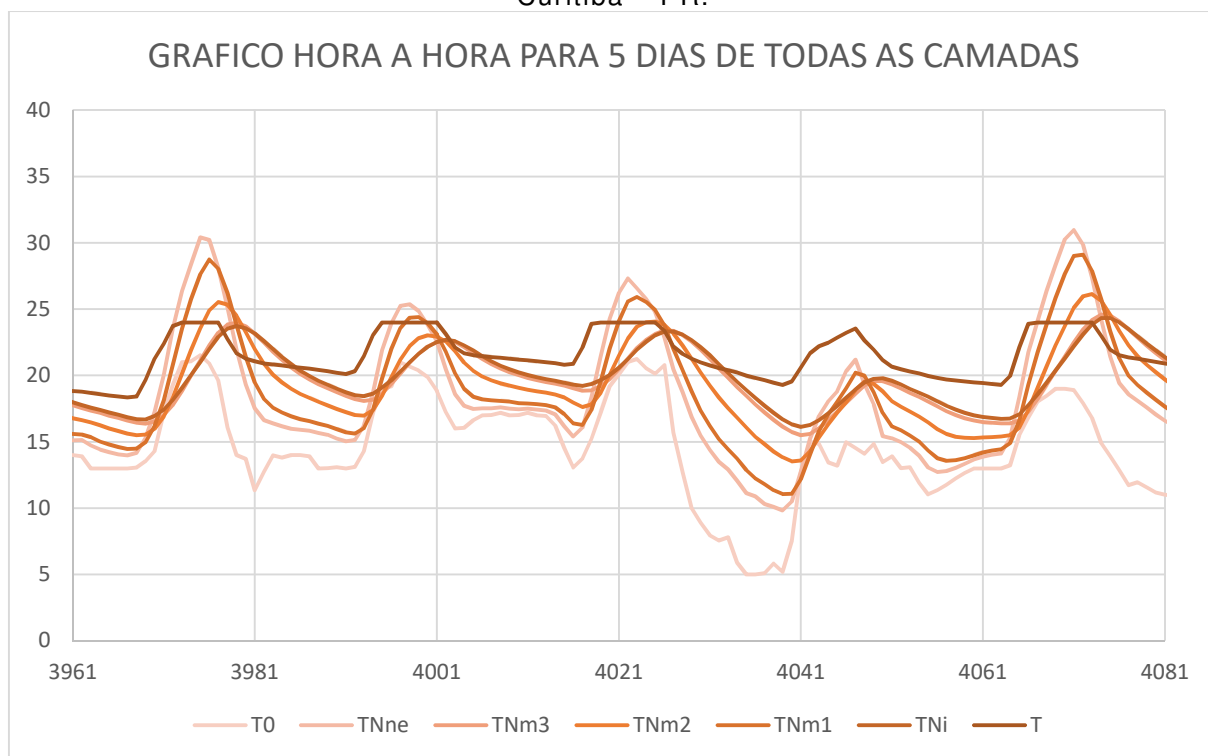
Fonte: O Autor.

Durante todo o ano a massa em azul da figura anterior representa a maior parte das diferenças de temperaturas dos cálculos dos dois métodos de cálculos realizados. A média das diferenças ficou em 1,16°C com desvio padrão 0,64 e erro padrão 0,006.

Considerando a diferença de complexidade dos métodos de cálculos e fatores como cálculo de coeficientes de convecção internos e externos, a diferença média é aceitável para continuidade das simulações.

De maneira a verificar também a correta geração de dados devido a transferência de energia entre camadas da parede externa da edificação simulada, gerou-se um gráfico que demonstra o comportamento em questão da temperatura de cada uma das cinco camadas (no caso do modelo com material com mudança de fase), GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1 – Gráfico hora a hora durante o período de cinco dias para a cidade de Curitiba – PR.



É perceptível o correto comportamento do modelo, haja visto o aumento ou redução gradual da temperatura a cada camada da parede norte. Concluindo assim que o modelo matemático que baseia o algoritmo representa de fato uma aproximação dos fenômenos reais.



## 7. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das simulações utilizando o algoritmo descrito anteriormente. Primeiramente, apresentando os dados obtidos dos cálculos para cada cidade, na ordem das zonas bioclimáticas, e no final será mostrado um comparativo do uso de material com mudança de fase entre cada uma das cidades analisadas.

### 7.1 CURITIBA (ZONA BIOCLIMÁTICA 1)

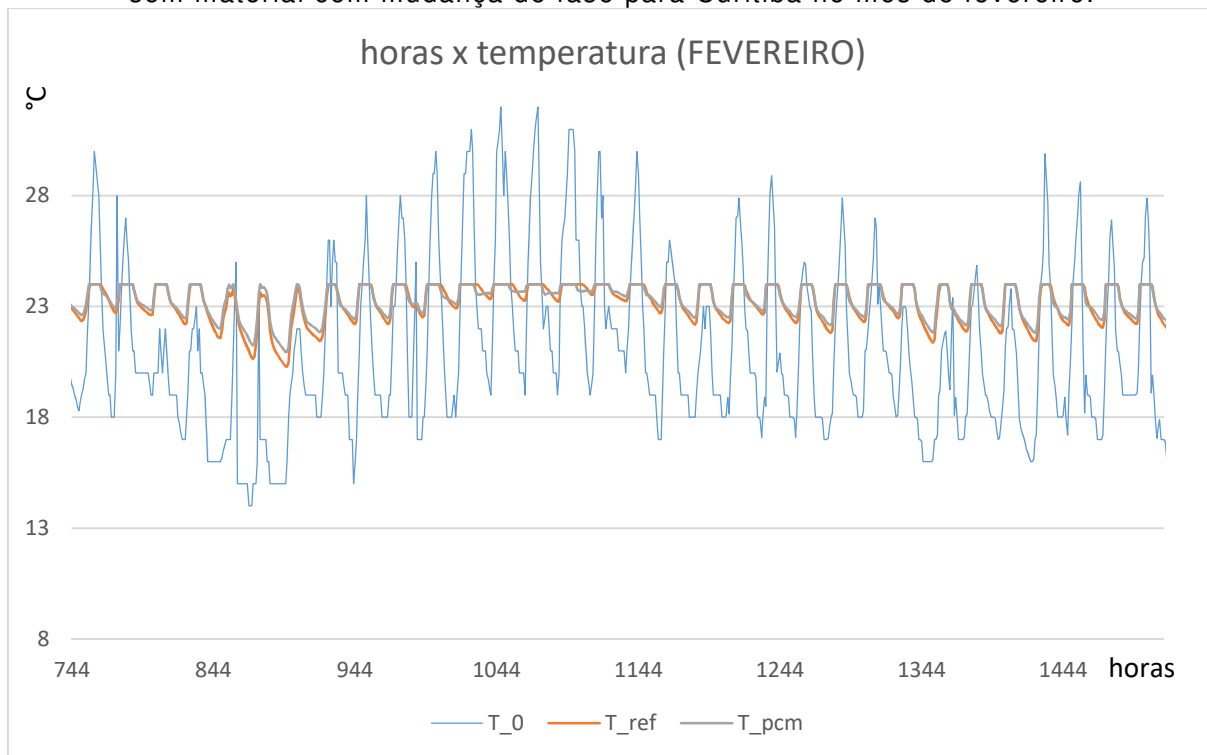
O modelo físico foi simulado com os materiais e cargas internas conforme descrito em capítulo anterior e com a base de dados climáticos para a cidade de Curitiba disponibilizado no site do EnergyPlus, durante 8760 horas, ou seja, um ano inteiro.

Como descrito no capítulo de modelo físico, o objetivo é utilizar o material com mudança de fase com a sua maior vantagem (consumo de energia para liquefação) potencializada. Busca-se primeiramente uma quantidade de material suficiente para que não haja aquecimento do composto na fase líquida, ou seja, toda a energia absorvida acima da temperatura de fusão será armazenada sem o aumento de temperatura. Para isso iniciou-se uma sequência de testes de espessuras de materiais com mudança de fase. Caso não fosse o suficiente, o algoritmo gerava um erro pedindo o aumento da espessura da camada. Sendo assim, para a cidade de Curitiba, testes com as espessuras: 1cm, 1,5cm e 2cm foram realizados e em todos se ultrapassava a energia para troca de fase e não utilizavam todo o potencial do material. Definindo a camada com 2,5cm não houve mais erros e o material se comportou da maneira esperada.

Para a cidade de Curitiba então foram simulados dois casos: 1) Cenário de referência; 2) Cenário com 2,5cm de material com mudança de fase.

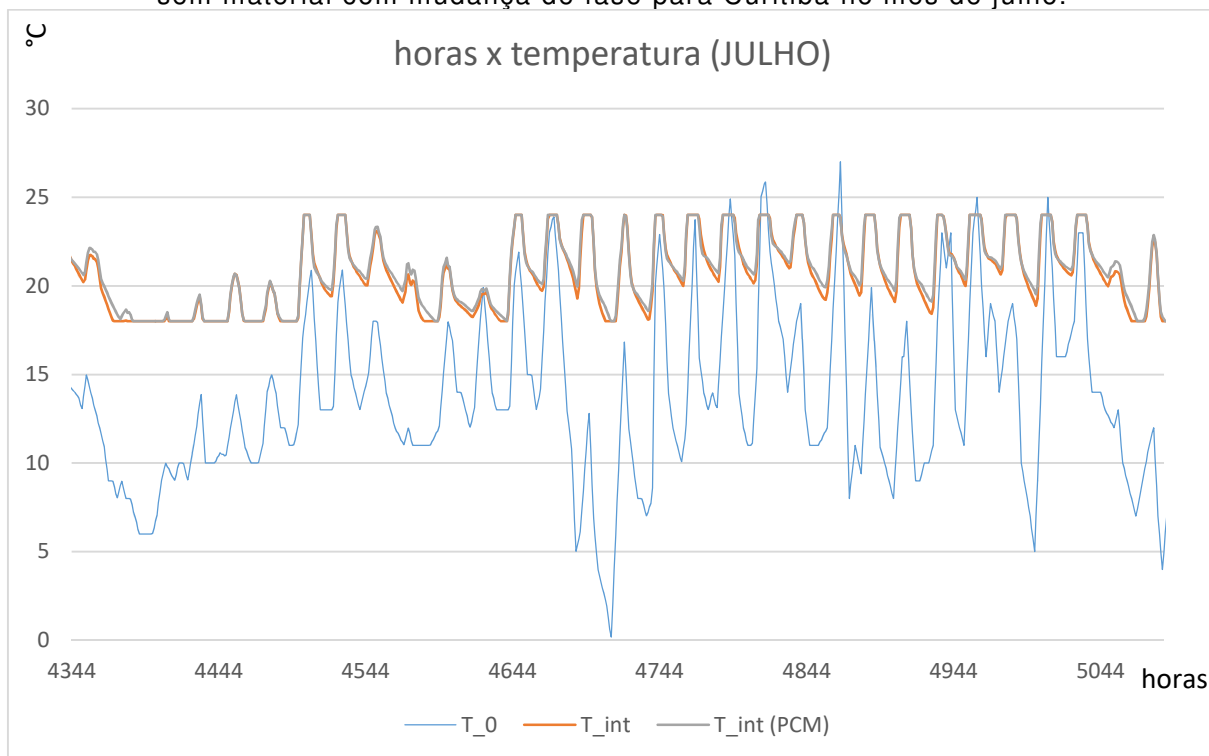
Os primeiros dados obtidos são as temperaturas externas e internas. As FIGURAS 35, 36 e 37 apresentam os comparativos entre a temperatura externa ( $T_0$ ), interna de referência ( $T_{ref}$ ) e interna com PCM ( $T_{PCM}$ ), para os meses de fevereiro (mais quente do ano) e julho (mais frio do ano), e o ano inteiro, respectivamente.

FIGURA 35 – Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Curitiba no mês de fevereiro.



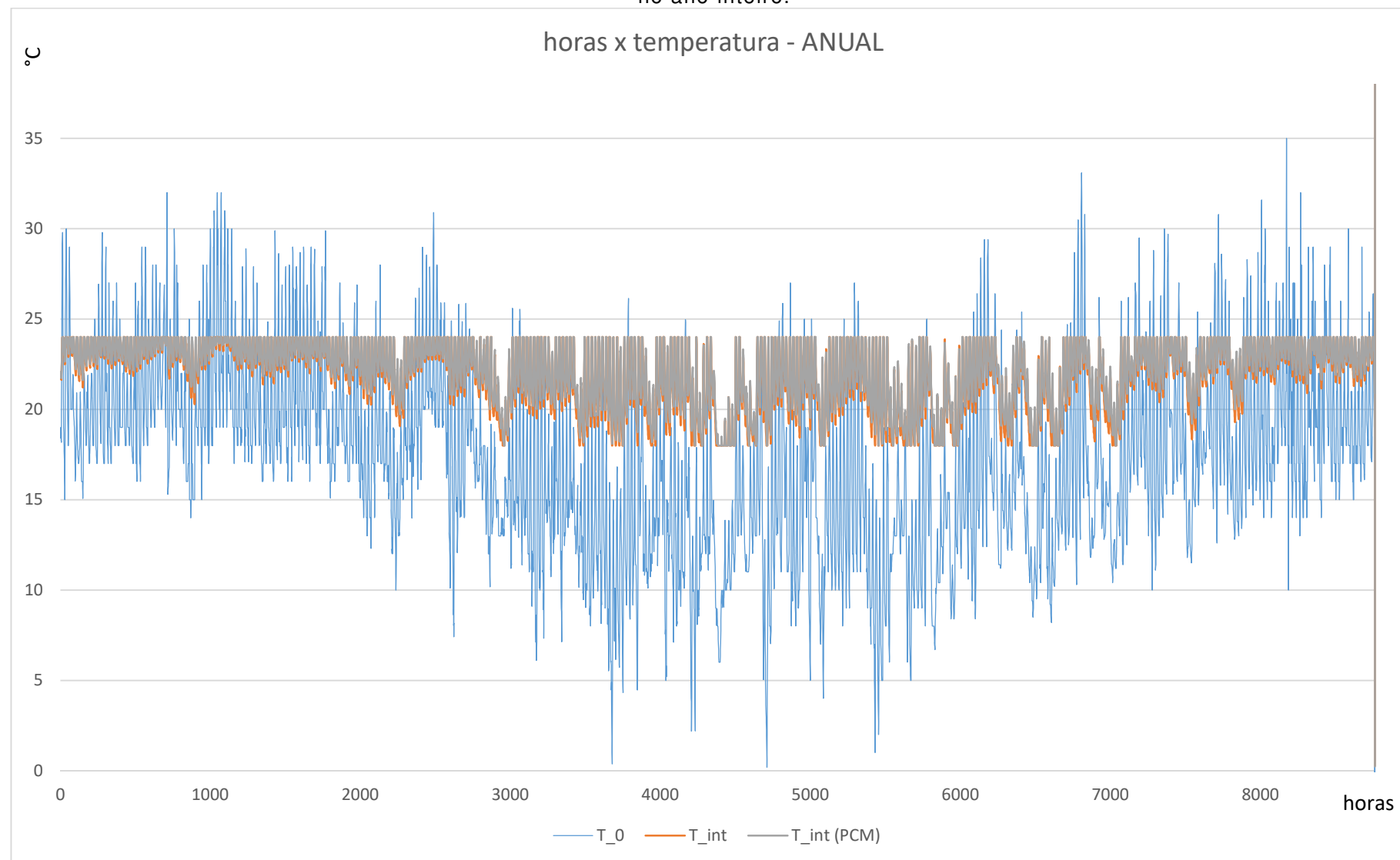
Fonte: O Autor.

FIGURA 36 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Curitiba no mês de julho.



Fonte: O Autor.

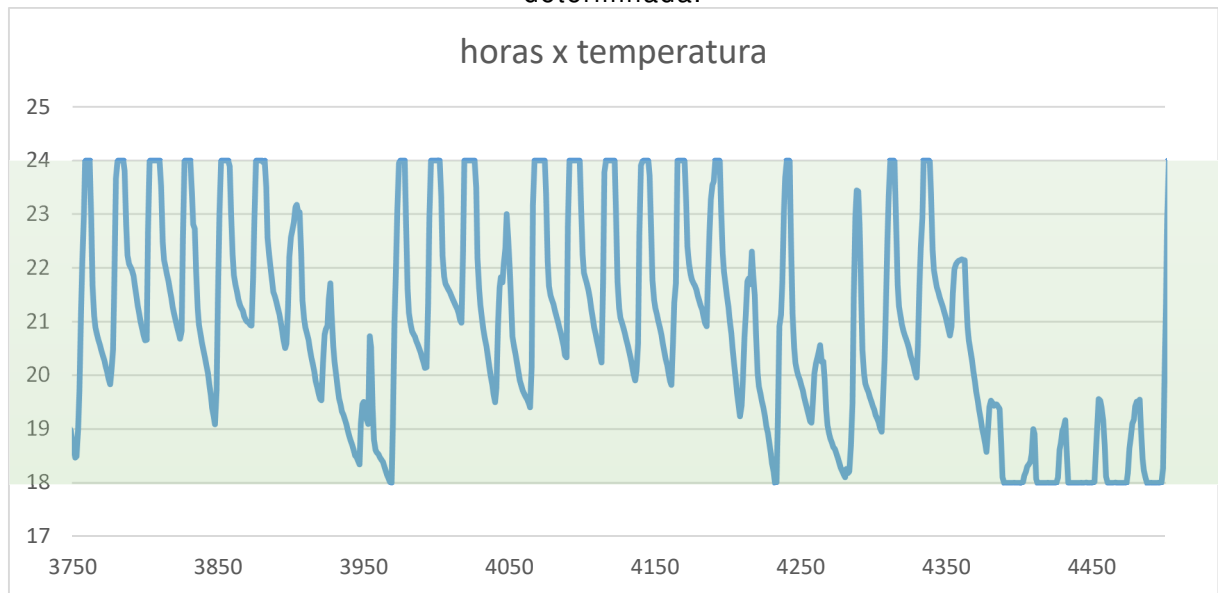
FIGURA 37 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Curitiba no ano inteiro.



Fonte: O Autor.

É perceptível o funcionamento do controle de temperatura interno com a manutenção das temperaturas entre 18° e 24°C. A FIGURA 38 apresenta um detalhe que demonstra esse efeito.

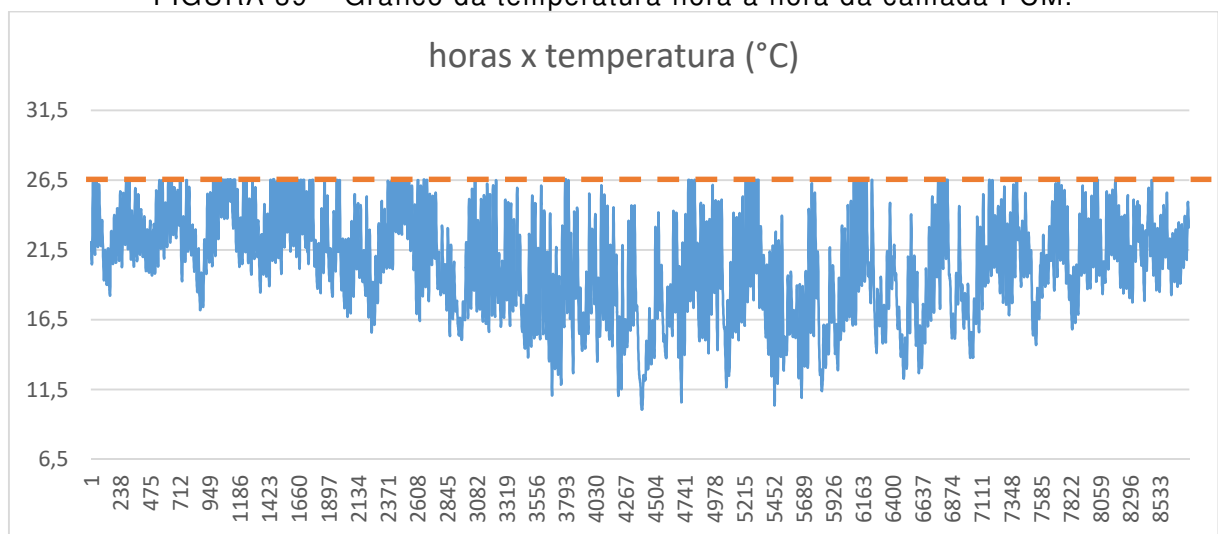
FIGURA 38 – Manutenção da temperatura interna dentro da faixa de conforto determinada.



Fonte: O Autor.

Considerando o funcionamento do algoritmo, o PCM não deve ultrapassar a temperatura de fusão, 26,5°C, para que não haja aquecimento de material liquefeito. A FIGURA 39 apresenta o gráfico, para todo o ano, da temperatura da camada do material de mudança de fase.

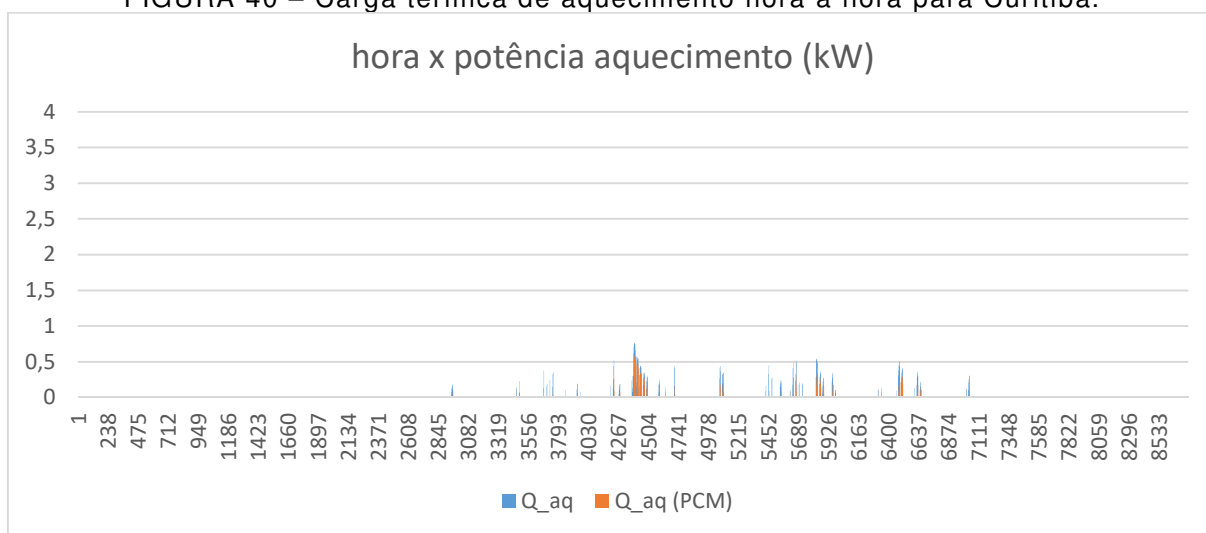
FIGURA 39 – Gráfico da temperatura hora a hora da camada PCM.



Fonte: O Autor.

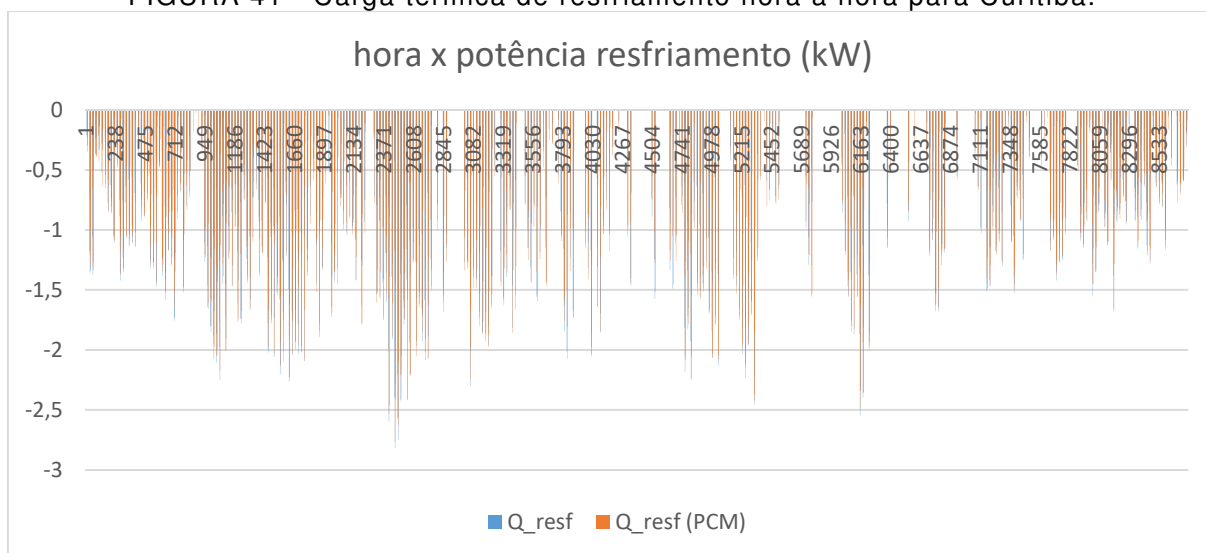
Os dados de quantidade de energia térmica, de aquecimento e resfriamento para manutenção do conforto interno no ambiente construído, também são importantes para a análise. Picos de energia podem sobrecarregar a rede, a redução destes ou deslocamento temporal são estratégias para aliviar carga na mesma. As FIGURAS 40 e 41 apresentam os gráficos da carga horária de todo o ano simulado para aquecimento e resfriamento, respectivamente.

FIGURA 40 – Carga térmica de aquecimento hora a hora para Curitiba.



Fonte: O Autor.

FIGURA 41 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Curitiba.



Fonte: O Autor.

Pode-se perceber pelos últimos 2 gráficos apresentados que, aparentemente, a quantidade de carga térmica de aquecimento quando do uso de material com mudança de fase é menor do que a do cenário referência.

A TABELA 3 a seguir apresenta os dados levantados de consumo para cada um dos casos simulados.

TABELA 3 – Resumo do consumo dos cenários simulados para Curitiba.

Cenário	Carga térmica aquecimento	Carga térmica resfriamento	Consumo Ventilação	Consumo energético total
	$\tilde{Q}_{AQ}$	$\tilde{Q}_{RESF}$	$\tilde{W}_{VENT}$	Estratégia 1
	$\tilde{Q}_{AQ,min}$	$\tilde{Q}_{RESF,min}$		Estratégia 2
				Estratégia 3
	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)
EEBA_ref	2,59	42,21	20,91	8,96
	2,59	21,39		4,80
				0,28
EEBA_PCM_2,5cm	1,13	42,80	20,91	8,79
	1,13	20,58		4,34
				0,22

Fonte: O Autor.

A tabela de resumo apresenta os valores totais anuais em kWh/m<sup>2</sup> dos dois casos simulados, sendo a primeira linha estratégia de cálculo 1 (apenas condicionamento de ar), a segunda linha estratégia de cálculo 2 (ventilação quando for ótimo) e a terceira linha estratégia de cálculo 3 (teórico com otimização das perdas pelo condicionamento de ar e ventilação quando possível). Os dados são:

- $\tilde{Q}_{AQ}$  e  $\tilde{Q}_{RESF}$  – Carga térmica para aquecimento ou resfriamento;
- $\tilde{Q}_{AQ,min}$  e  $\tilde{Q}_{RESF,min}$  – Carga térmica para aquecimento ou resfriamento apenas quando não há possibilidade do uso da ventilação;
- $\tilde{W}_{VENT}$  – Carga de ventilação;
- $EEAC$ ,  $EEAC_{min}$  e  $EEAC_{min,teorico}$  – Consumos considerando as estratégias 1, 2 e 3, respectivamente, descritas no capítulo sobre o algoritmo;

Analisando apenas a influência do PCM, percebe-se uma redução na carga térmica para aquecimento, enquanto as cargas dos dois casos para resfriamento permanecem muito próximas. Em questão de consumo de energia elétrica houve uma redução do EEAC de 1,95% (sendo COP=5) com a utilização de material com mudança de fase.

Considerando a segunda estratégia, que utiliza a ventilação inteligente, percebe-se um potencial considerável, para ambos os cenários, de redução da carga

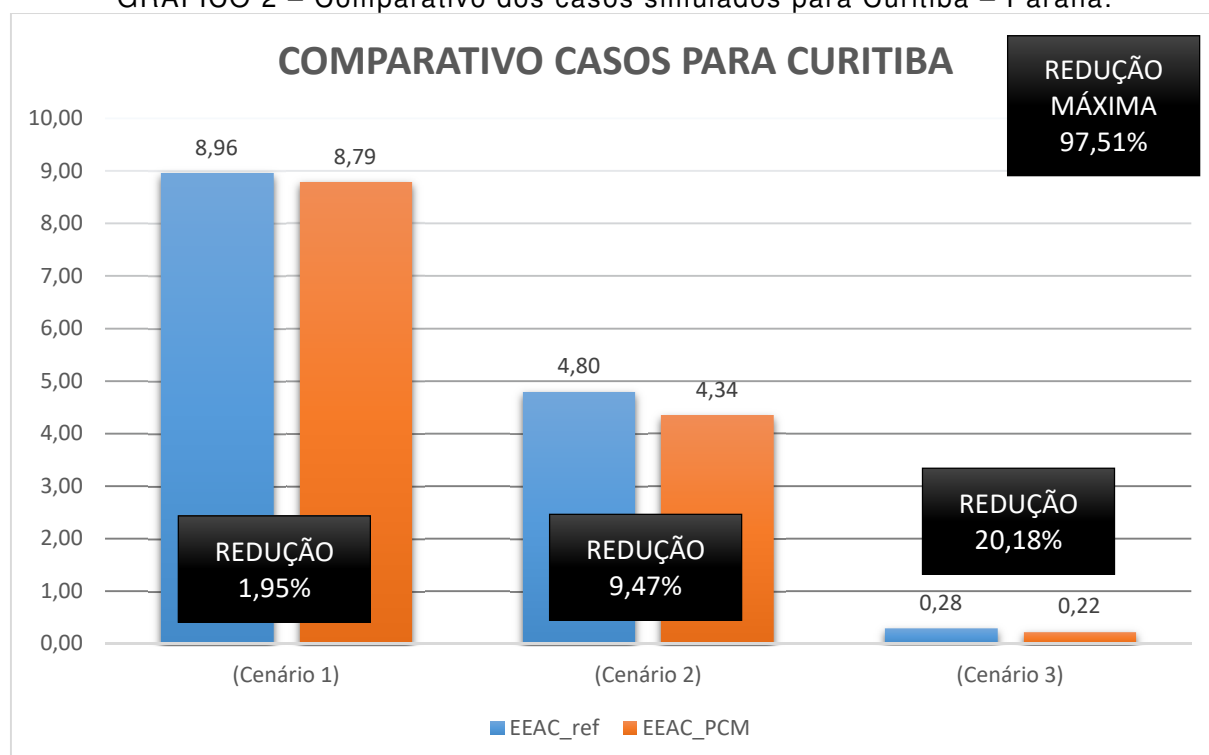
térmica para resfriamento, sendo que para o cenário com PCM há a redução de mais da metade da carga. No consumo elétrico ( $EEAC_{min}$ ) temos uma redução de 9,47% utilizando materiais com mudança de fase juntamente com a ventilação inteligente da sala comercial.

Como também proposto para este trabalho tem-se ainda a terceira estratégia de análise do consumo ( $EEAC_{min,teorico}$ ). Com esta estratégia e com o uso do PCM podemos obter um potencial total de redução de 8,96kWh/m<sup>2</sup> (valor do cenário de referência) para 0,22kWh/m<sup>2</sup>, ou seja, uma redução de mais de 40 vezes do consumo energético na cidade de Curitiba.

A proposta do cálculo da terceira estratégia vem do potencial máximo de eficiência dentro dos limites teóricos, conforme apresentado. Apesar de ainda não terem sido desenvolvidas tecnologias que permitam tal produtividade, em termos de geração de energia térmica, o potencial de fato existe, e o uso de sistemas inteligentes tem um papel importante neste limite de eficiência. A utilização de métodos que dão preferência à ventilação chegam a reduzir de 8,79kWh/m<sup>2</sup> para 4,34kWh/m o consumo de energia elétrica para a cidade de Curitiba.

O Gráfico 2 apresenta um resumo do comparativo de possíveis reduções dos casos simulados para a cidade escolhida da Zona Bioclimática 1.

GRÁFICO 2 – Comparativo dos casos simulados para Curitiba – Paraná.



Fonte: O autor.

Outro resultado gerado pelo algoritmo é o valor de exergia anual da radiação solar. Sendo a definição de exergia a qualidade de um corpo de gerar energia mecânica, exergia solar significa o total de energia que se possa extrair da radiação solar. Com essa exergia é possível então, se somada ao consumo anual de manutenção da faixa de temperatura de conforto e ventilação, obter o total de exergia utilizada, e também a fração correspondente a exergia solar deste total (EQUAÇÃO 37).

$$\frac{Ex_{\dot{Q}_{sun}}}{Ex_{\dot{Q}_{sun}} + |\dot{W}_{vent}| + |\dot{W}_{HP}|} \quad (37)$$

Sendo:

$Ex_{Q_{sun}}$  = Exergia Anual de Radiação Solar

$|\dot{W}_{vent}|$  = Consumo energético anual para ventilação

$|\dot{W}_{HP}|$  = Consumo energético anual para manutenção da faixa de conforto térmico, considerando as estratégias de cálculo apresentadas no método.

A TABELA 4 apresenta um resumo dos resultados dos valores acima discriminados. As frações de exergia solar recebida variam de acordo com o caso, cenário e variação do COP, coeficiente de performance.

TABELA 4 – Frações de Exergia para Curitiba - Paraná

	<b>EXERGIA ANUAL RADIAÇÃO SOLAR</b> (kWh/m².ano)	<b>FRAÇÃO DE EXERGIA RECEBIDA (%)</b> $\frac{Ex_{\dot{Q}_{sun}}}{Ex_{\dot{Q}_{sun}} +  \dot{W}_{vent}  +  \dot{W}_{HP} }$				
		COP				
		1	2	3	4	5
REFERÊNCIA	247,8434	79,04%	85,12%	87,36%	88,53%	89,24%
		84,66%	88,28%	89,55%	90,21%	90,60%
		91,74%	91,98%	92,06%	92,10%	92,12%
PCM 2,5cm	247,8380	79,26%	85,25%	87,45%	88,60%	89,30%
		85,33%	88,64%	89,80%	90,39%	90,75%
		91,84%	92,03%	92,09%	92,12%	92,14%

Fonte: O Autor.

O quadro comparativo das frações sob os diferentes cenários e COPs mostra que se considerado o pior caso, paredes de alvenaria sem PCM sem ventilação, o



valor da exergia significa 79,04% de toda energia recebida no ambiente construído. Quando são analisados ambientes mais inteligentes, cenários 2 e 3 onde são utilizados sistemas de ventilação e condicionadores de ar otimizados, é perceptível que a exergia pode representar até aproximadamente 92% de toda energia recebida pela edificação.

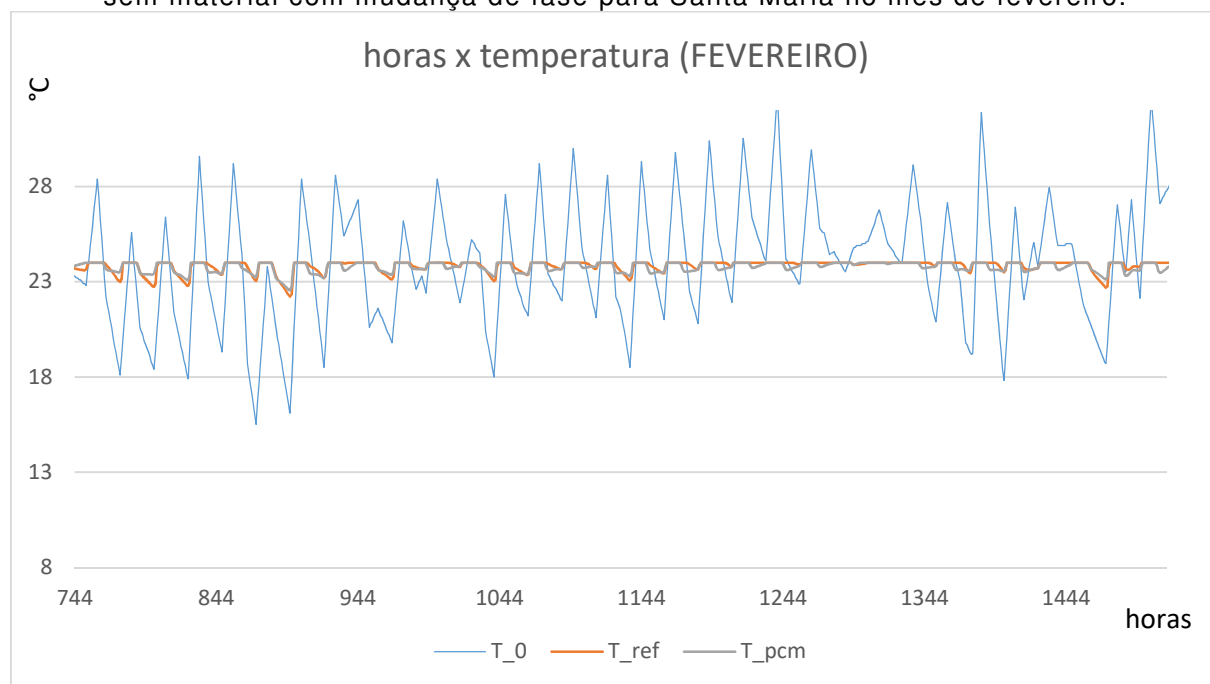
## 7.2 SANTA MARIA (ZONA BIOCLIMÁTICA 2)

Após todas as verificações de funcionamento do algoritmo e validações pode-se dar continuidade nas simulações para as cidades das outras zonas bioclimáticas conforme definido no capítulo de método.

Primeiramente, o algoritmo verificou a espessura do material PCM de maneira a utilizar todo o seu potencial. O algoritmo não apresentou erro com o PCM escolhido a partir de 5 centímetros de espessura e assim foram iniciadas as simulações.

A segunda cidade então a ser simulada foi Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul. As FIGURA 42 e FIGURA 43 mostram a variação térmica em fevereiro e julho respectivamente.

FIGURA 42 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Santa Maria no mês de fevereiro.

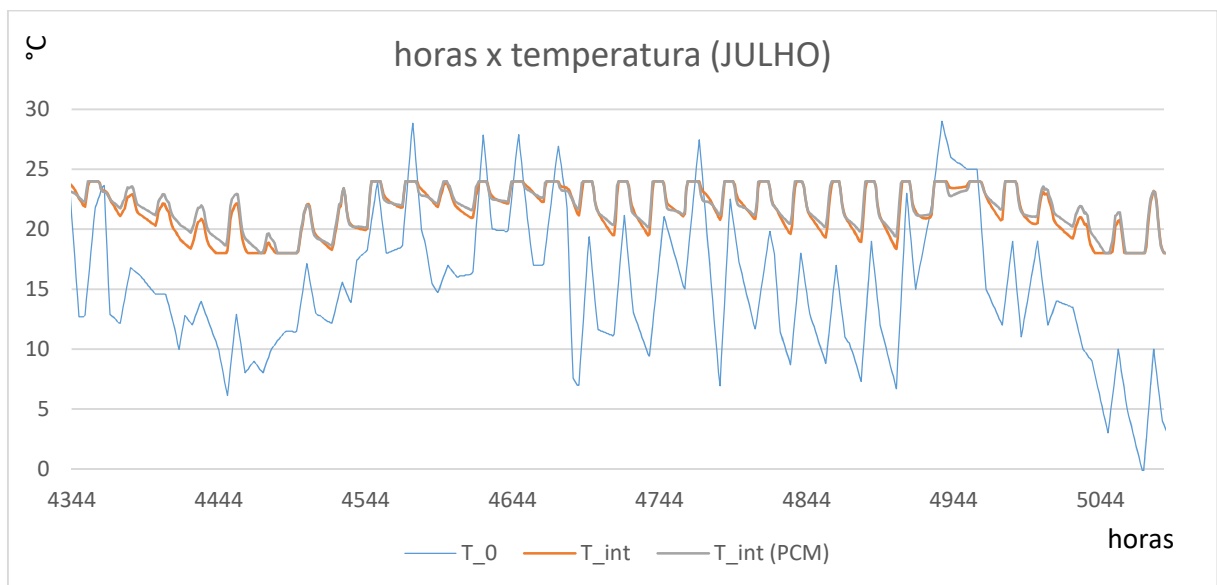


Fonte: O Autor

Quando analisados os gráficos apenas no caso do inverno, podemos prever um melhor cenário de consumo de energia devido aos menores picos de baixas

temperaturas, uma das hipóteses do uso do PCM. No caso do mês de fevereiro, a temperatura em ambos os casos fica muito próxima da máxima limite para acionamento do controle de temperatura ( $24^{\circ}\text{C}$ ) tanto durante o dia quanto a noite. O que aparentemente indica que não há tempo para o resfriamento das paredes externas, situação que seria ideal para o PCM.

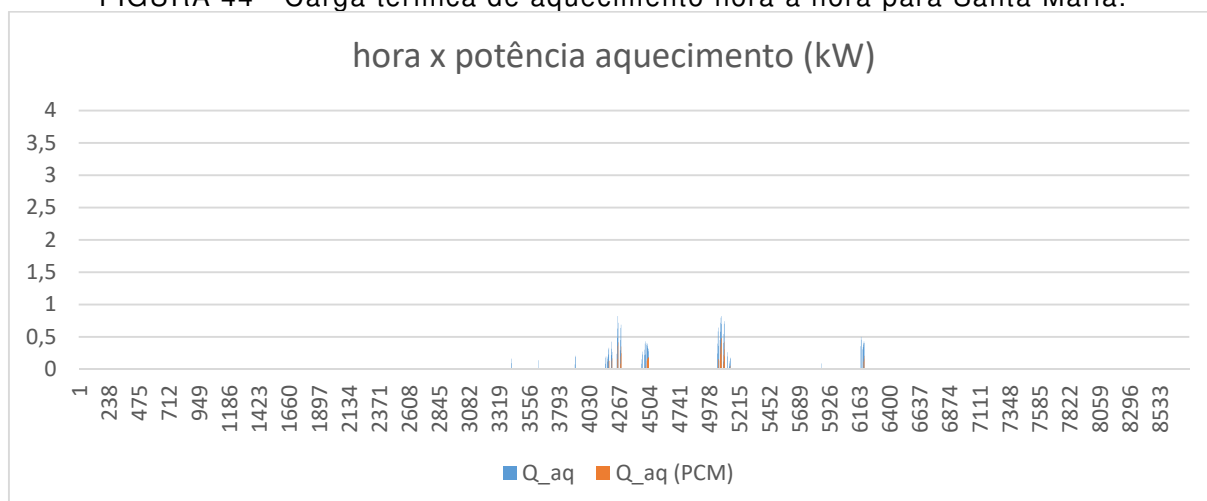
FIGURA 43 - Comparativo hora a hora das temperaturas interna e externas, com e sem material com mudança de fase para Santa Maria no mês de julho.



Fonte: O Autor.

A FIGURA 44 apresenta a quantidade de carga térmica necessária para o aquecimento da edificação determinada em ambos os casos estudados. É notável uma redução de picos de potência para manutenção da temperatura nos meses de inverno quando utilizado PCM na parede externa no ambiente construído.

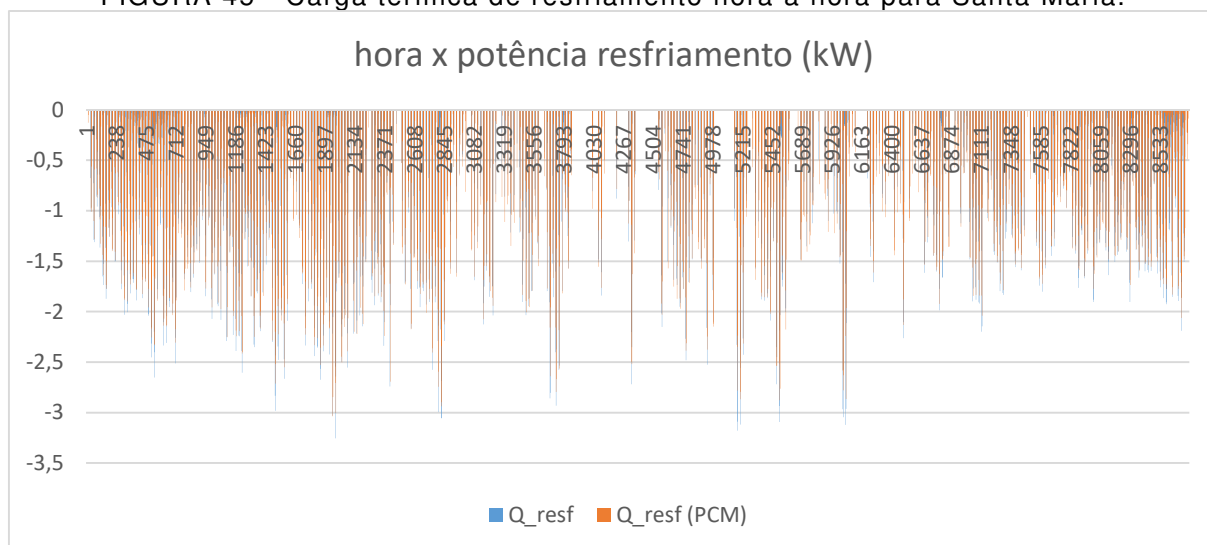
FIGURA 44 - Carga térmica de aquecimento hora a hora para Santa Maria.



Fonte: O Autor.

Na figura 45 temos a carga térmica necessária para manutenção da temperatura máxima de 24°C. Apesar de alguns picos de potência parecerem menores, não se pode ter certeza que há redução no consumo energético.

FIGURA 45 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Santa Maria.



Fonte: O Autor.

A TABELA 5 apresenta um resumo dos consumos para os dois casos estudados e os 3 estratégias de cálculo definidos.

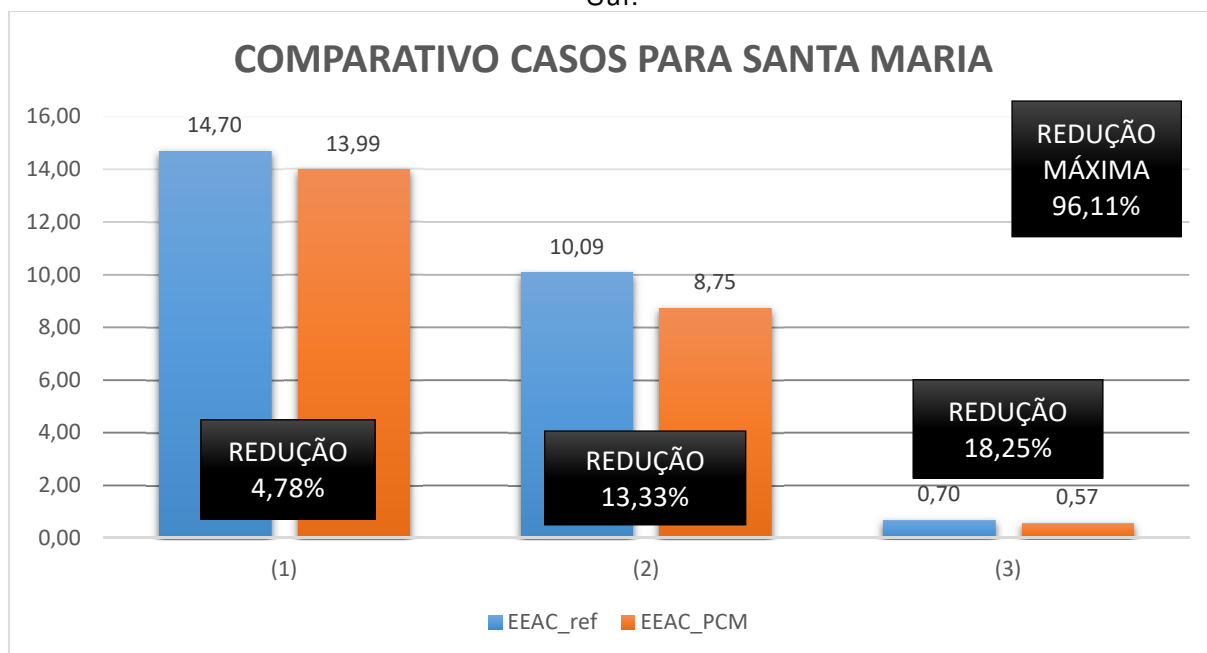
TABELA 5 - Resumo consumo dos cenários simulados para Santa Maria.

Cenário	$\tilde{Q}_{AQ}$	$\tilde{Q}_{RESE}$	$\tilde{W}_{VENT}$	$EEAC$
	$\tilde{Q}_{AQ,min}$	$\tilde{Q}_{RESE,min}$		$EEAC_{min}$
				$EEAC_{min,teorico}$
	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)
EEBA_ref	1,37	72,12	20,91	14,70
	1,37	49,09		10,09
				0,70
EEBA_PCM_5cm	0,37	69,60	20,91	13,99
	0,37	43,35		8,75
				0,57

Fonte: O Autor.

Através da análise dos dados, é perceptível que com a utilização de PCM existe uma redução considerável do consumo de energia necessária para manutenção da temperatura no inverno, 72,99%. O mesmo efeito não é tão acentuado para as altas temperaturas, onde a redução do consumo energético para resfriamento é de apenas 3,49%. Considerando todo o consumo elétrico para manutenção da faixa de temperatura determinada neste trabalho a redução é de 4,78%. A figura também apresenta os valores de consumo para os cenários 2 e 3. A ventilação inteligente (estratégia 2) teve um grande impacto nos casos onde foi necessário resfriamento, no caso 1 (sem PCM), por exemplo, impactou na redução de aproximadamente 32% do consumo energético para manutenção da faixa de temperatura de conforto. A ventilação também trouxe melhoras ao caso com material de mudança de fase, a redução proporcionada pela utilização de PCM que era de 4,78% no caso 1, passou para 13,33%. Os dados também apresentaram uma redução de 18,25% com a utilização de PCM no cenário 3, chegando a um potencial de redução de 96,11% para a cidade de Santa Maria. O GRÁFICO 3 apresenta estes valores.

GRÁFICO 3 – Comparativo dos casos simulados para Santa Maria – Rio Grande do Sul.



Fonte: O Autor.

A segunda etapa dos cálculos são as frações de exergia possíveis para as considerações e levantamento de consumos realizados (TABELA 6). Para o caso desta cidade da Zona Bioclimática 2 também se tem frações altas de exergia correspondente a toda a energia recebida no ambiente construído. A exergia corresponde entre 74 e 92% aproximadamente considerando COPs entre 1 e 5.

TABELA 6 - Frações de Exergia para Santa Maria – Rio Grande do Sul

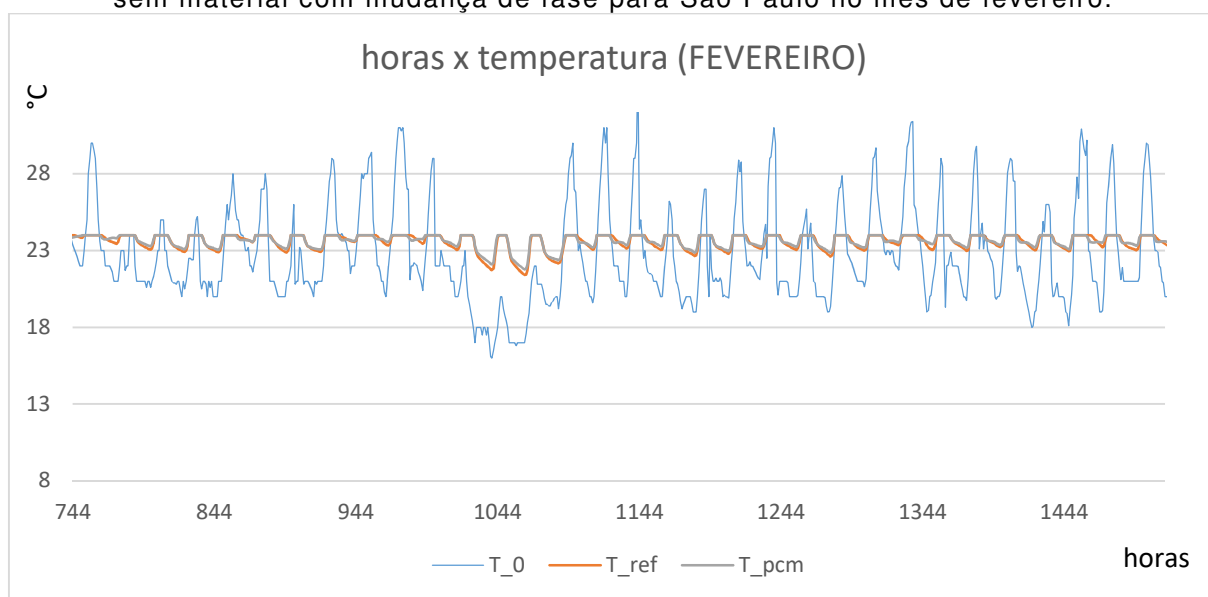
	EXERGIA ANUAL RADIÇÃO SOLAR (kWh/m².ano)	FRAÇÃO DE EXERGIA RECEBIDA (%)				
		$\frac{Ex_{\dot{Q}_{sun}}}{Ex_{\dot{Q}_{sun}} +  W_{vent}  +  W_{HP} }$				
		COP				
		1	2	3	4	5
REFERÊNCIA	267,1732	73,89%	82,25%	85,47%	87,18%	88,24%
		78,92%	85,27%	87,62%	88,85%	89,60%
		91,63%	92,18%	92,37%	92,46%	92,52%
PCM 5cm	267,1631	74,62%	82,70%	85,79%	87,43%	88,44%
		80,52%	86,20%	88,27%	89,35%	90,01%
		91,83%	92,28%	92,43%	92,51%	92,56%

Fonte: O Autor.

### 7.3 SÃO PAULO (ZONA BIOCLIMÁTICA 3)

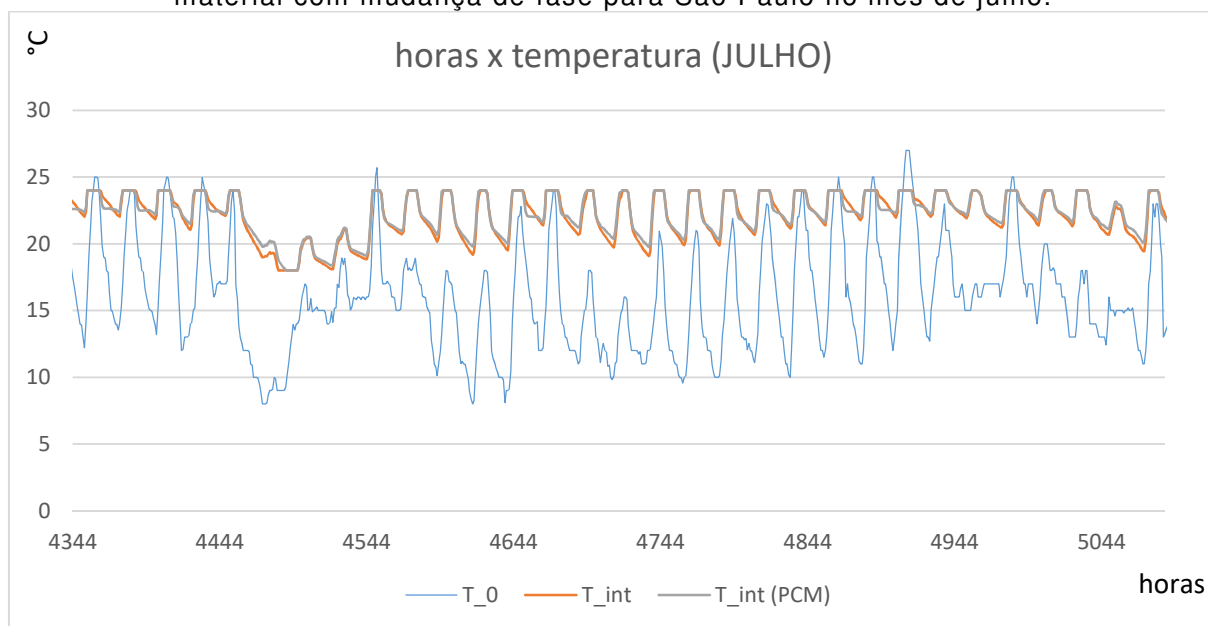
Para a cidade de São Paulo, capital, o teste de espessura de material PCM gerou o mesmo resultado de Curitiba, 2,5 centímetros. Com essa variável definida iniciaram-se as etapas de simulações. As FIGURAS 46 e 47 respectivamente representam hora a hora as temperaturas: externas, internas sem PCM e internas com PCM; para os meses de fevereiro e julho da base de dados climáticos definida.

FIGURA 46 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para São Paulo no mês de fevereiro.



Fonte: O Autor.

FIGURA 47 - Comparativo hora a hora das temperaturas interna e externas, com e sem material com mudança de fase para São Paulo no mês de julho.

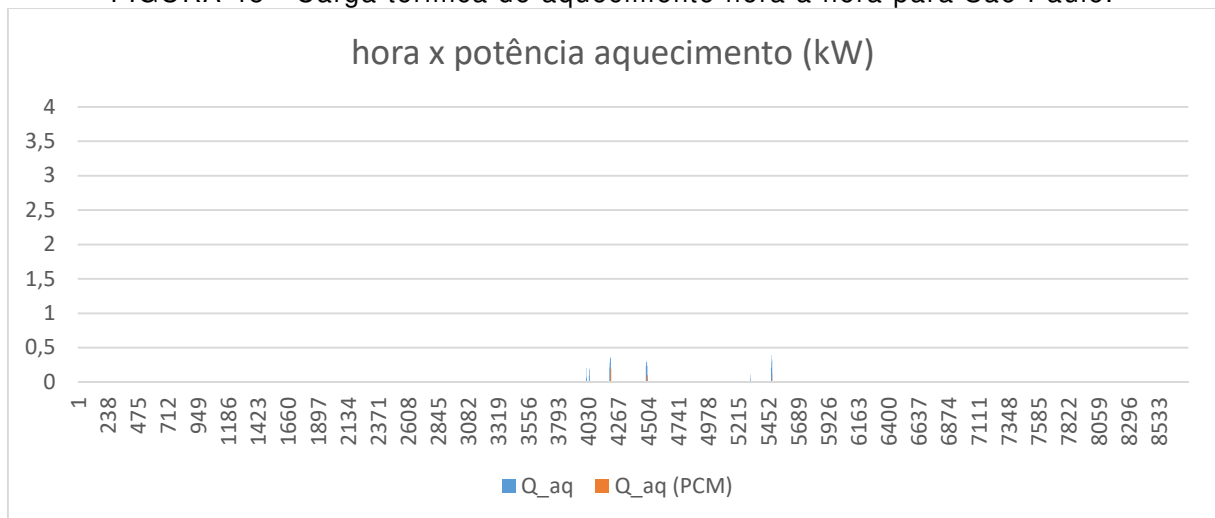


Fonte: O Autor.

Durante o mês de fevereiro é perceptível a diferença para uma cidade como Santa Maria, em São Paulo já é possível notar maiores quedas de temperaturas durante a noite. Assim como no mês de julho há menos dias onde haja a necessidade de aquecimento.

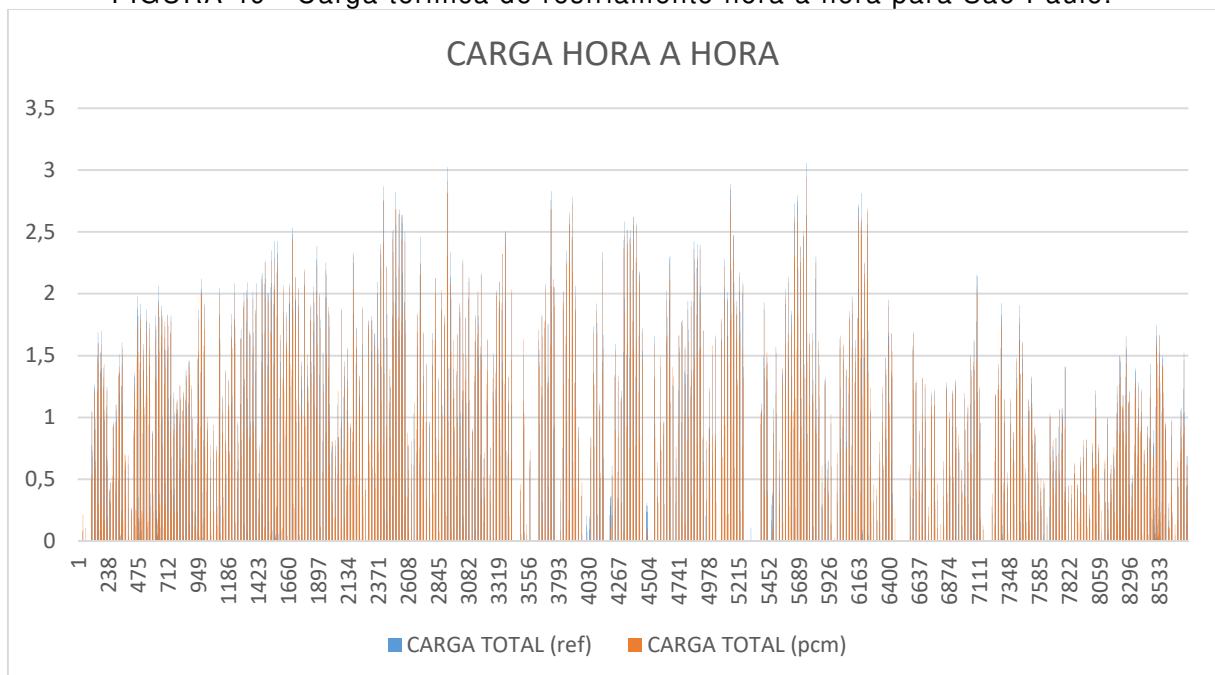
As FIGURAS 48 e 49 apresentam as cargas de aquecimento e resfriamento respectivamente para todas as horas do ano para a cidade de São Paulo.

FIGURA 48 - Carga térmica de aquecimento hora a hora para São Paulo.



Fonte: O Autor.

FIGURA 49 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para São Paulo.



Fonte: O Autor.

A necessidade de aquecimento na edificação simulada para cidade São Paulo é ainda menor do que a calculada para a cidade de Santa Maria no Rio Grande do Sul.

A TABELA 7 apresenta valores para o consumo energético da edificação simulada. A utilização de material com mudança de fase na parede externa reduziu a necessidade de aquecimento de 0,27kWh/(m<sup>2</sup>·ano) para 0,05kWh/(m<sup>2</sup>·ano) de energia térmica, ou seja, 81,48% de redução, porém para o resfriamento a redução foi de apenas 1,01kWh/(m<sup>2</sup>·ano) de energia térmica.

TABELA 7 - Resumo consumo energético dos cenários simulados para São Paulo.

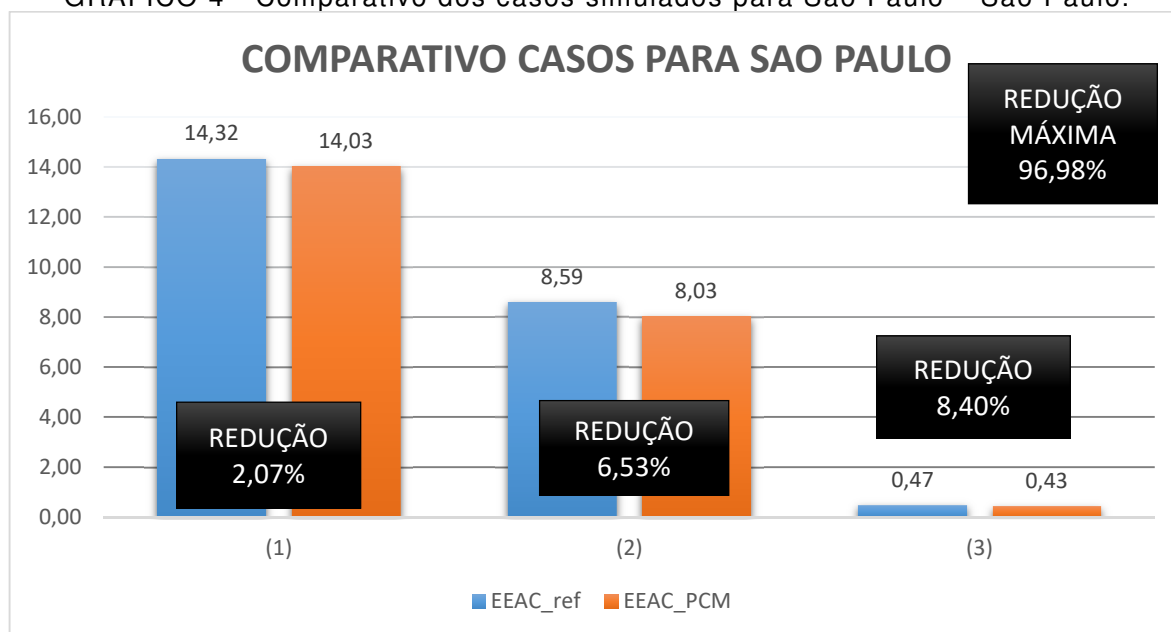
Cenário	$\tilde{Q}_{AQ}$	$\tilde{Q}_{RESF}$	$\tilde{W}_{VENT}$	$EEAC$
	$\tilde{Q}_{AQ,min}$	$\tilde{Q}_{RESF,min}$		$EEAC_{min}$
				$EEAC_{min,theorico}$
	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)		(kWh/m <sup>2</sup> .ano)
EEBA_ref	0,27	71,35	20,91	14,32
	0,27	42,70		8,59
				0,47
EEBA_PCM_2,5cm	0,05	70,09	20,91	14,03
	0,05	40,12		8,03
				0,43

Fonte: O Autor.

O GRÁFICO 4 apresenta o comparativo dos consumos energéticos na edificação com ou sem material com mudança de fase. Há uma redução mínima de 2,07% de energia elétrica no primeiro cenário, porém quando utilizada a ventilação como sistema de condicionamento de ar a redução passa a ser de 6,53%. Para a cidade em questão o cenário 3 apresenta resultados de 96,98% de possível redução de energia elétrica com a utilização do PCM juntamente com sistemas mais otimizados de controle de temperatura interna.



GRÁFICO 4 - Comparativo dos casos simulados para São Paulo – São Paulo.



Fonte: O Autor.

As frações de exergia apresentadas na TABELA 8 expõem resultados muito próximos aos de Santa Maria, ficando na faixa entre 74% para COP=1 no primeiro cenário e 92% para COP=5 no cenário 3.

TABELA 8 - Frações de Exergia para São Paulo.

	EXERGIA ANUAL RADIAÇÃO SOLAR (kWh/m².ano)	FRAÇÃO DE EXERGIA RECEBIDA (%)				
		$\frac{Ex_{\dot{Q}_{sun}}}{Ex_{\dot{Q}_{sun}} +  \dot{W}_{vent}  +  \dot{W}_{HP} }$				
		COP				
		1	2	3	4	5
REFERÊNCIA	264,6069	74,09%	82,35%	85,52%	87,21%	88,25%
		80,55%	86,19%	88,25%	89,31%	89,97%
		91,91%	92,29%	92,42%	92,48%	92,52%
PCM 2,5cm	264,5989	74,40%	82,54%	85,66%	87,31%	88,33%
		81,25%	86,58%	88,52%	89,53%	90,14%
		91,98%	92,32%	92,44%	92,50%	92,53%

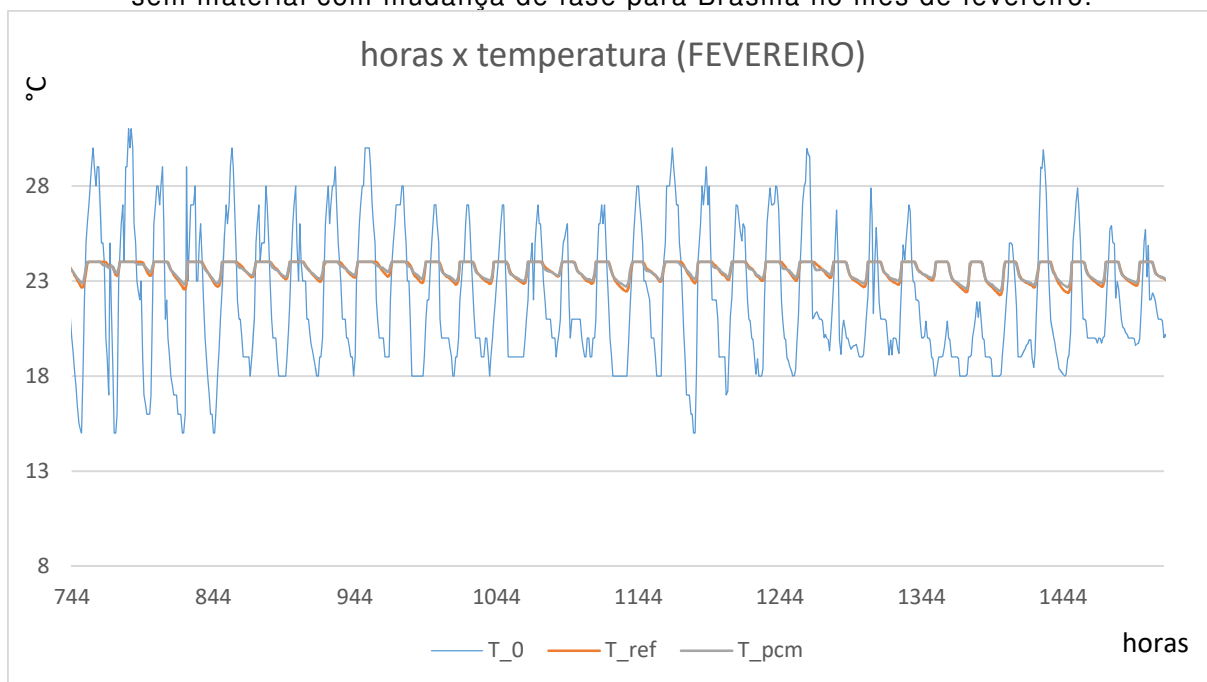
Fonte: O Autor.

#### 7.4 BRASILIA (ZONA BIOCLIMÁTICA 4)

A quarta cidade a ser simulada foi Brasília, e logo iniciados os testes de espessura mínima já foi atingido um resultado satisfatório. A simulação realizada não apresentou erros com a espessura do material com mudança de fase a partir de 2,5 centímetros, utilizando assim todo o seu potencial de armazenamento de energia durante a liquefação.

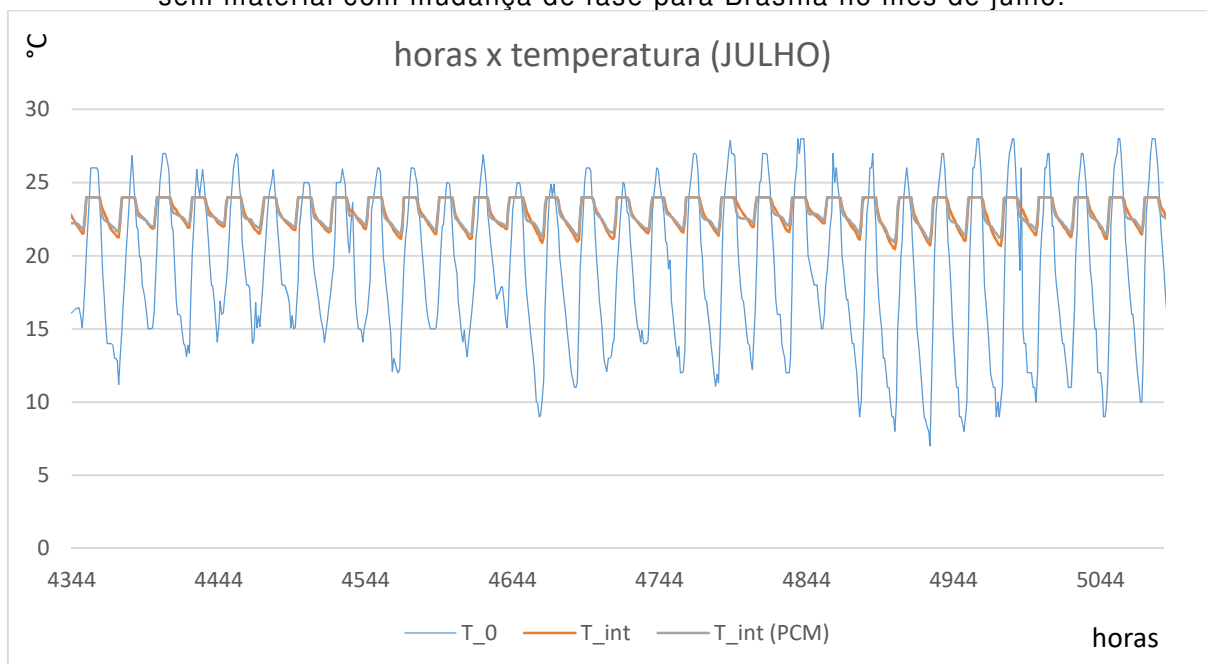
Definida a espessura do material estudado iniciou-se então as simulações dos casos de referência e com material PCM. As temperaturas hora a hora para os meses de fevereiro e junho estão apresentadas nas FIGURAS 50 e 51.

FIGURA 50 – Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Brasília no mês de fevereiro.



Fonte: O Autor.

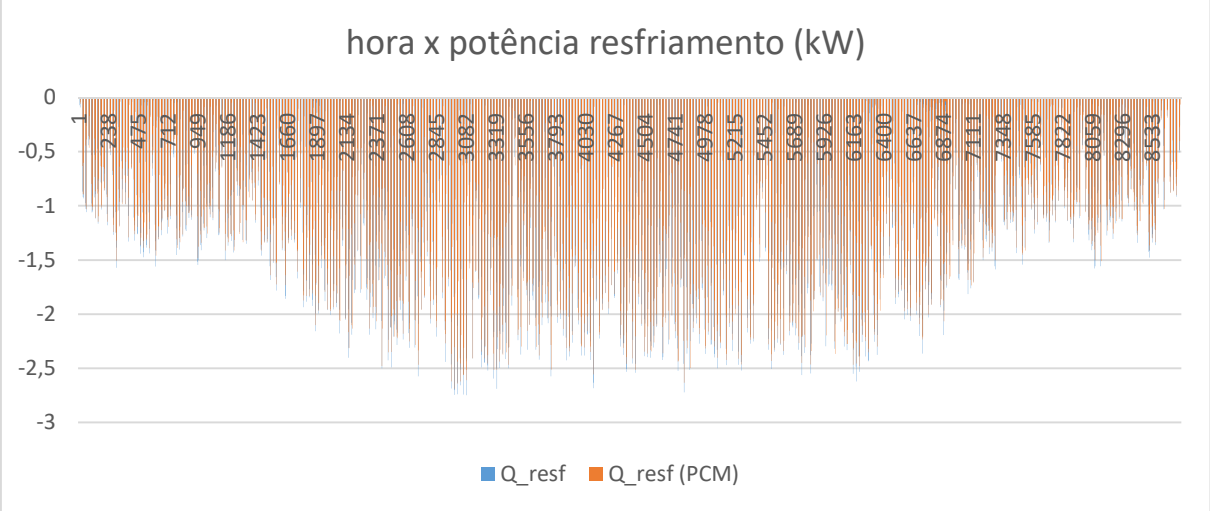
FIGURA 51 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Brasília no mês de julho.



Fonte: O Autor.

Os gráficos para os meses padrões de verão e inverno não permite conclusões sem que se olhe as cargas térmicas totais, porém, percebe-se pela alta variação da temperatura externa dentro do mesmo dia que este fator pode ser de grande importância na espessura do PCM devido ao seu resfriamento a noite. As cargas térmicas para resfriamento estão apresentadas na FIGURA 52.

FIGURA 52 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Brasília.



Fonte: O Autor.

As simulações para a cidade de Brasília apresentaram um consumo zero para aquecimento e um consumo de energia térmica de 100,36kWh/m²ano no caso de referência e 97,10kWh/m²ano com material de mudança de fase (TABELA 9). O consumo elétrico total para o caso de referência foi de 20,07kWh/m²ano, com o material de mudança de fase foi para 19,42kWh/m²ano. Para os cenários 2 e 3 de cálculo de consumo de energia elétrica foi necessária uma ventilação forçada de 20,91kWh/m²ano.

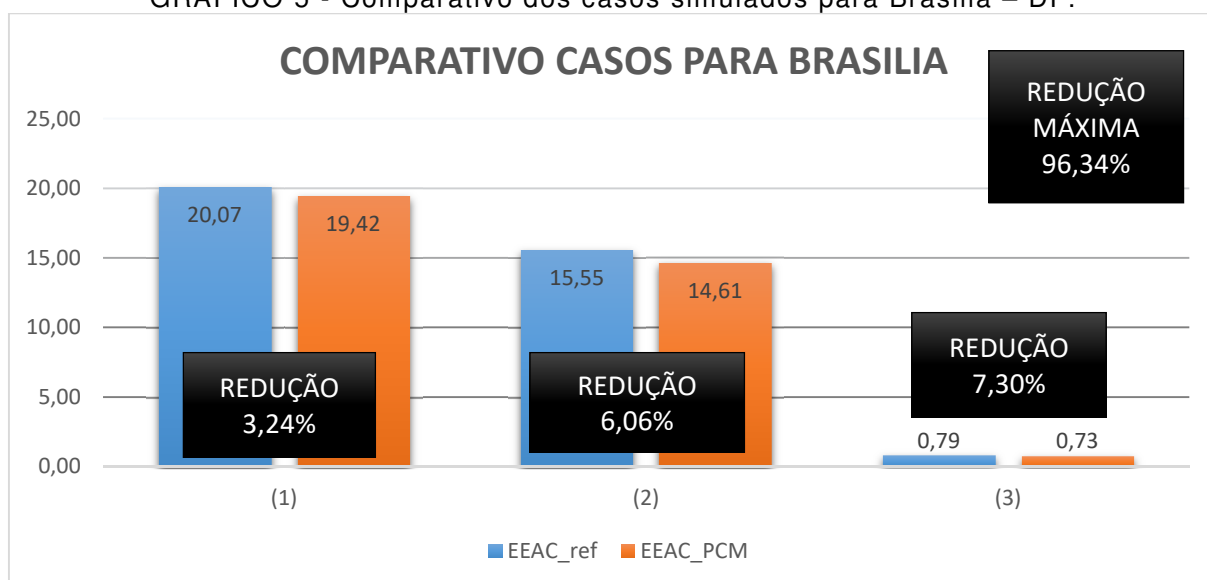
TABELA 9 – Resumo do consumo energético dos cenários simulados para Brasília.

Cenário	$\tilde{Q}_{AQ}$	$\tilde{Q}_{RESF}$	$\tilde{W}_{VENT}$	$EEAC$
	$\tilde{Q}_{AQ,min}$	$\tilde{Q}_{RESF,min}$		$EEAC_{min}$
				$EEAC_{min,teorico}$
	(kWh/m².ano)	(kWh/m².ano)		(kWh/m².ano)
EEBA_ref	0,00	100,36	20,91	20,07
	0,00	77,74		15,55
				0,79
EEBA_PCM_2,5cm	0,00	97,10	20,91	19,42
	0,00	73,03		14,61
				0,73

Fonte: O Autor.

O GRAFICO 5 apresenta um comparativo dos consumos de energia elétrica necessários para os casos estudados para Brasília, considerando cada um dos três cenários de cálculos definidos. A utilização de PCM em comparação com o caso de referência desta pesquisa, apresenta uma possibilidade de redução do consumo de energia em 3,24%. Considerada a ventilação inteligente como forma de controle de temperatura auxiliando o condicionamento de ar a redução passa a ser 6,06% do consumo elétrico. No último cenário, onde um sistema de condicionamento de ar é otimizado ao limite juntamente com a ventilação inteligente, a redução do consumo elétrico, quando da utilização de material com mudança de fase, tem o potencial de chegar a 96,34%, passando de um consumo de 20,07kWh/m<sup>2</sup>ano para 0,79kWh/m<sup>2</sup>ano.

GRÁFICO 5 - Comparativo dos casos simulados para Brasília – DF.



Fonte: O Autor.

A TABELA 10 apresenta a exergia anual de radiação solar e as frações, dadas as variações de COP, de exergia para a cidade de Brasília. Apesar de a exergia anual ser maior do que a da última cidade estudada as frações ficaram abaixo das da cidade de São Paulo. A exergia anual ficou em 285,49 kWh/(m<sup>2</sup>·ano) e as frações entre 70,19% e 92,95% para ambos os casos, com e sem material de mudança de fase.

TABELA 10 - Frações de Exergia para Brasília

	EXERGIA ANUAL RADIAÇÃO SOLAR (kWh/m².ano)	FRAÇÃO DE EXERGIA RECEBIDA (%)				
		$\frac{Ex_{\dot{Q}_{sun}}}{Ex_{\dot{Q}_{sun}} +  \dot{W}_{vent}  +  \dot{W}_{HP} }$				
		COP				
REFERÊNCIA	285,4860	1	2	3	4	5
		70,19%	80,06%	84,00%	86,12%	87,45%
		74,32%	82,68%	85,91%	87,62%	88,67%
PCM 2,5cm	285,4773	91,99%	92,58%	92,77%	92,87%	92,93%
		70,75%	80,43%	84,27%	86,33%	87,62%
		75,24%	83,25%	86,32%	87,93%	88,93%
		92,07%	92,62%	92,80%	92,90%	92,95%

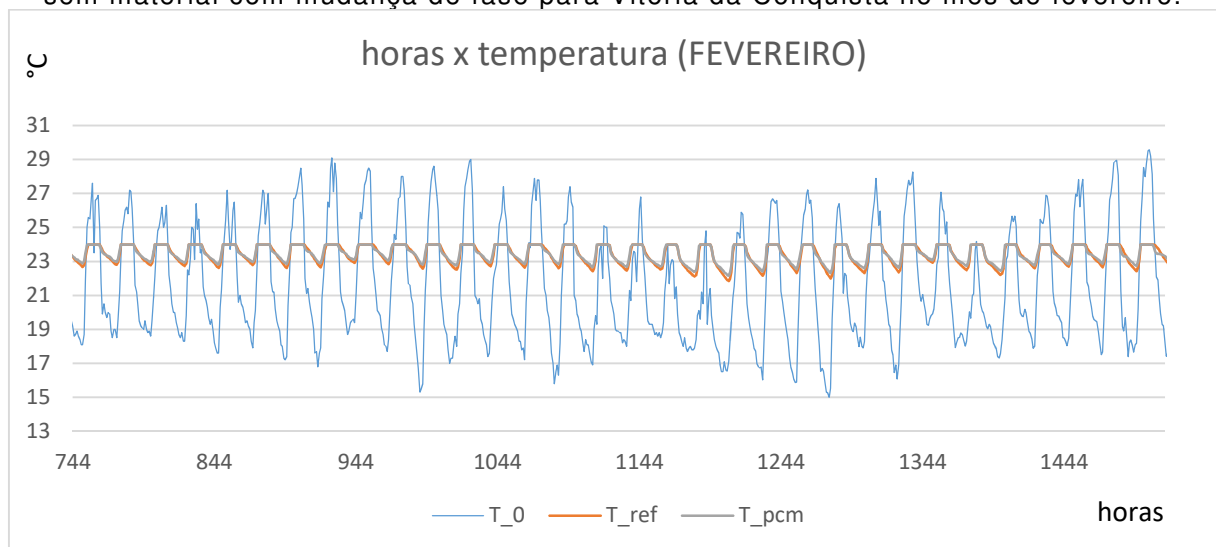
Fonte: O Autor.

## 7.5 VITÓRIA DA CONQUISTA (ZONA BIOCLIMÁTICA 5)

A cidade escolhida para a Zona Bioclimática 5 definida pela NBR 15.220 (ABNT, 2003) foi Vitória da Conquista no estado da Bahia. As simulações iniciais apresentaram a necessidade de um material com mudança de fase de 2,5 centímetros para utilizar todo o seu potencial.

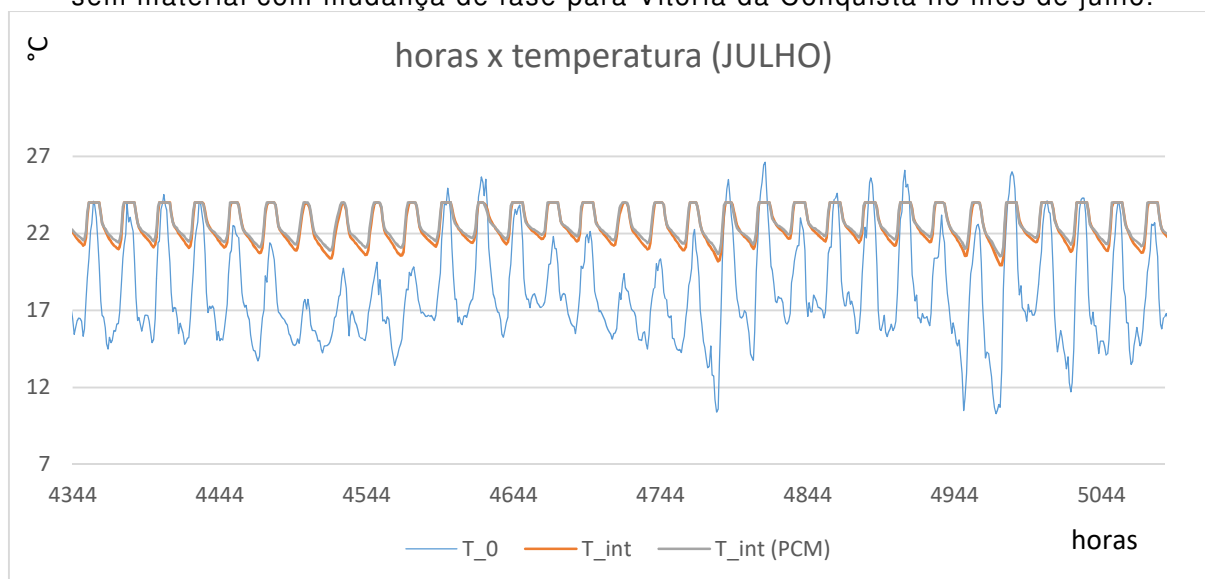
Com a espessura definida iniciam-se as simulações para os dois casos definidos. As simulações geraram dados para as FIGURAS 53 e 54 com as temperaturas hora a hora para o mês de fevereiro e julho (verão e inverno).

FIGURA 53 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Vitória da Conquista no mês de fevereiro.



Fonte: O Autor.

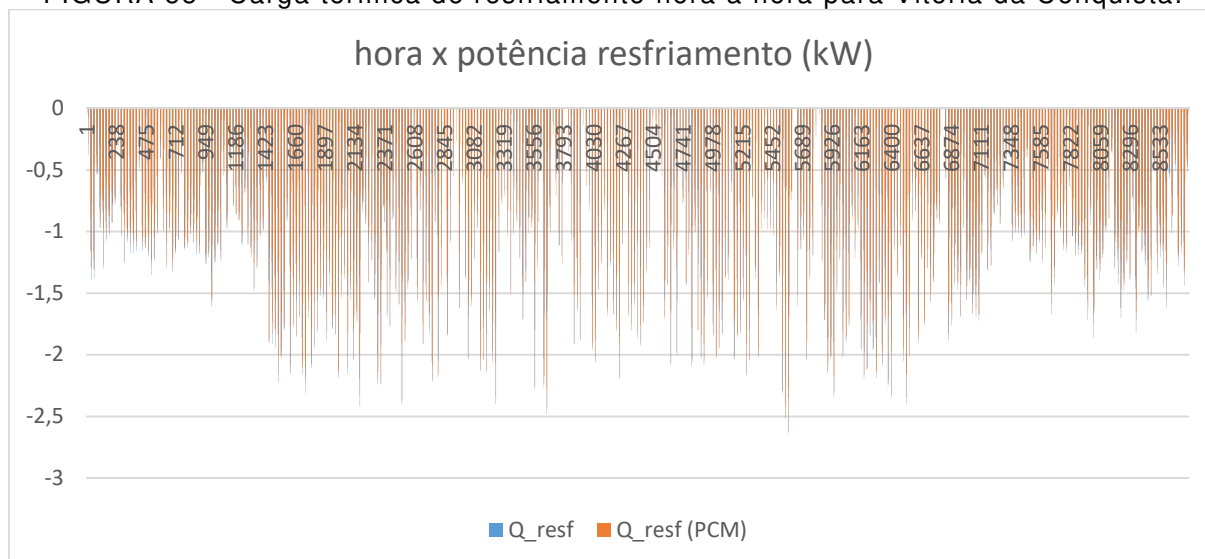
FIGURA 54 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Vitória da Conquista no mês de julho.



Fonte: O Autor.

Assim como para Brasília as temperaturas ficam muito próximas da temperatura máxima de conforto ( $24^{\circ}\text{C}$ ), não sendo necessário aquecimento. A FIGURA 55 mostra a carga térmica de resfriamento para todo o ano na cidade agora estudada.

FIGURA 55 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Vitória da Conquista.



Fonte: O Autor.

A TABELA 11 apresenta um resumo dos dados dos consumos de energia térmica e elétrica para as simulações realizadas. Confirma de fato a não necessidade de aquecimento em qualquer hora do ano, e uma necessidade de resfriamento de

66,04kWh/(m<sup>2</sup>·ano) de energia térmica de resfriamento e 65,62kWh/(m<sup>2</sup>·ano) quando utilizado material com mudança de fase. Transformando em consumo elétrico com COP=5, o caso de referência consome 13,21kWh/(m<sup>2</sup>·ano) de energia elétrica enquanto o caso com material PCM 13,12kWh/(m<sup>2</sup>·ano), uma redução de 0,64%. No cenário de cálculo 2 a redução do consumo elétrico é de 4,16%. A redução máxima de energia elétrica alcançada é de 96,88% quando no cenário 3 é utilizado PCM como uma das camadas da parede externa da edificação.

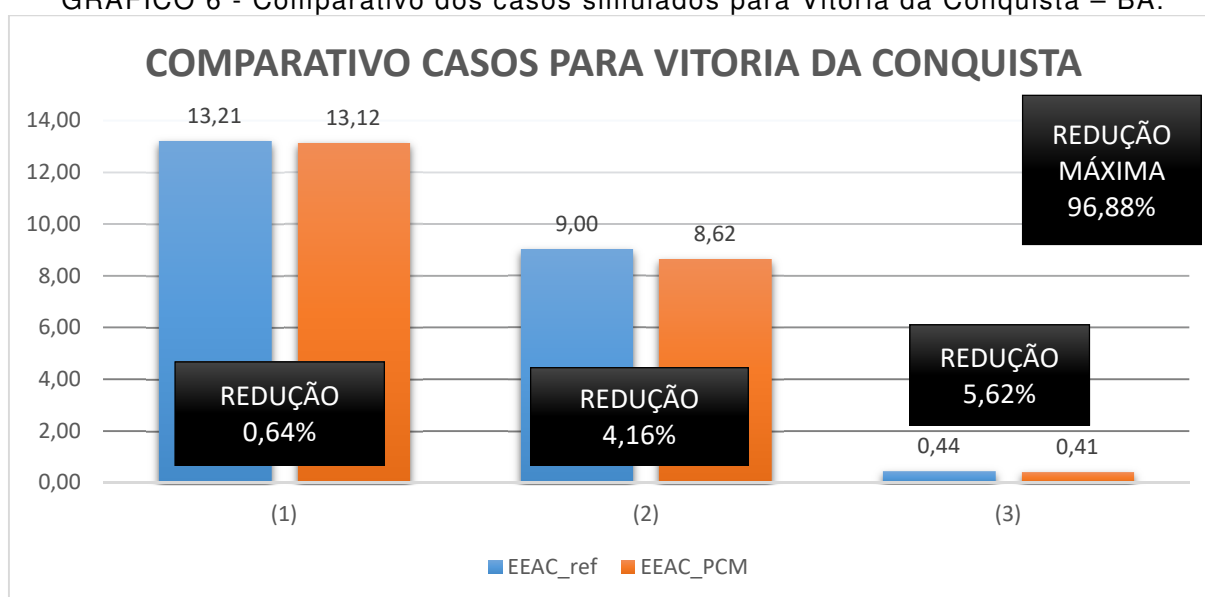
TABELA 11 - Resumo do consumo energético dos cenários simulados para Vitória da Conquista.

Cenário	$\tilde{Q}_{AQ}$	$\tilde{Q}_{RESF}$	$\bar{W}_{VENT}$	$EEAC$
	$\tilde{Q}_{AQ,min}$	$\tilde{Q}_{RESF,min}$		$EEAC_{min}$
				$EEAC_{min,theorico}$
	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)		(kWh/m <sup>2</sup> .ano)
EEBA_ref	0,00	-66,04	20,91	13,21
	0,00	-44,99		9,00
				0,44
EEBA_PCM_2,5cm	0,00	-65,62	20,91	13,12
	0,00	-43,11		8,62
				0,41

Fonte: O Autor.

O GRAFICO 6 apresenta um resumo dos comparativos de maneira gráfica.

GRÁFICO 6 - Comparativo dos casos simulados para Vitória da Conquista – BA.



Fonte: O Autor.

O cálculo da exergia anual (TABELA 12) de radiação solar gerou um resultado de 210,8585kWh/(m²·ano), aproximadamente 26% menor do que o calculado para Brasília, porém as frações de exergia variaram aproximadamente na mesma faixa entre 70 e 90%.

TABELA 12 – Frações de exergia para Vitória da Conquista.

	EXERGIA ANUAL RADIAÇÃO SOLAR  (kWh/m².ano)	FRAÇÃO DE EXERGIA RECEBIDA (%)				
		$\frac{Ex_{\dot{Q}_{sun}}}{Ex_{\dot{Q}_{sun}} +  \dot{W}_{vent}  +  \dot{W}_{HP} }$				
		COP				
		1	2	3	4	5
REFERÊNCIA	210,8585	70,80%	79,63%	83,09%	84,93%	86,07%
		76,19%	82,93%	85,45%	86,77%	87,58%
		90,13%	90,55%	90,69%	90,76%	90,81%
PCM 2,5cm	210,8534	70,90%	79,69%	83,13%	84,96%	86,10%
		76,71%	83,23%	85,66%	86,93%	87,71%
		90,17%	90,57%	90,71%	90,77%	90,81%

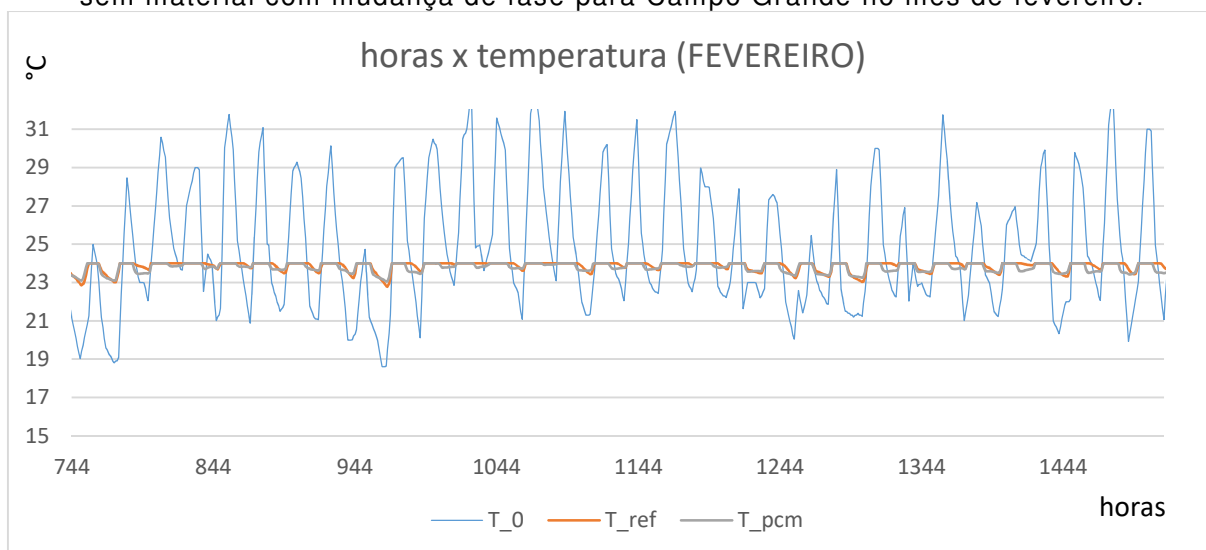
Fonte: O Autor.

## 7.6 CAMPO GRANDE (ZONA BIOCLIMÁTICA 6)

Para a cidade de Campo Grande no estado de Mato Grosso do Sul a espessura mínima calculada do material com mudança de fase foi de 10 centímetros, e esse aumento, se comparado as outras cidades, pode ser entendido com a FIGURA 56, um comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas para ambos os casos simulados, referência e com PCM. No mês de fevereiro a necessidade de condicionamento da ar para manutenção da temperatura em 24°C (temperatura máxima da faixa de conforto térmico) é quase constante, havendo uma diminuição dessa necessidade durante o inverno (mês de julho – FIGURA 57).

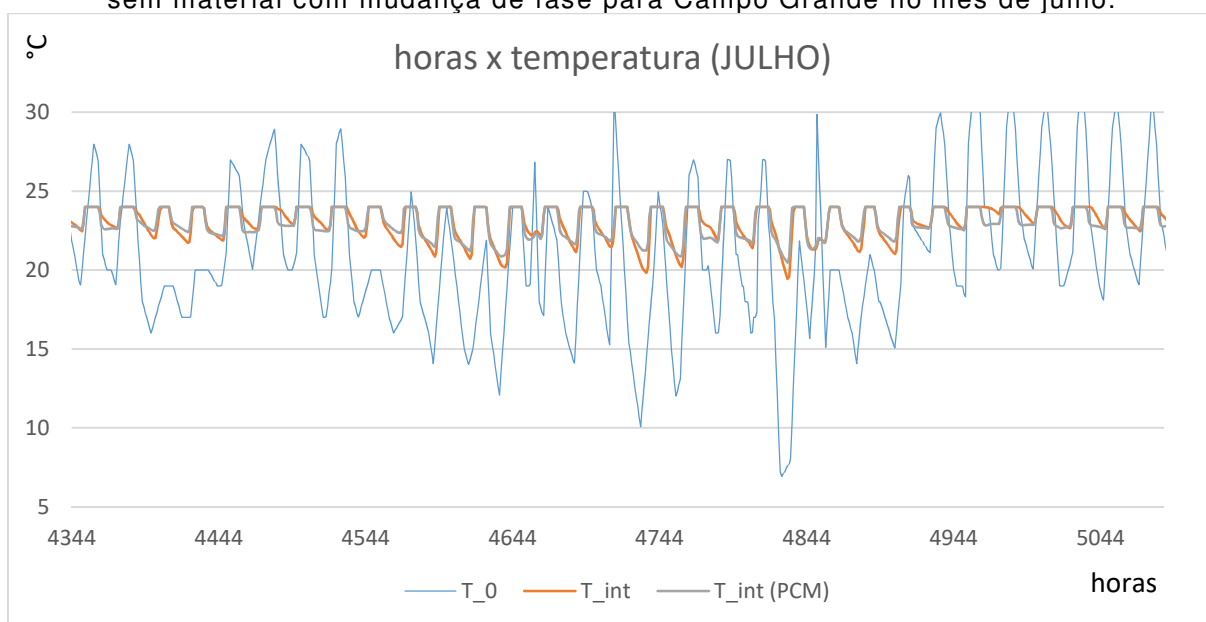


FIGURA 56 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Campo Grande no mês de fevereiro.



Fonte: O Autor.

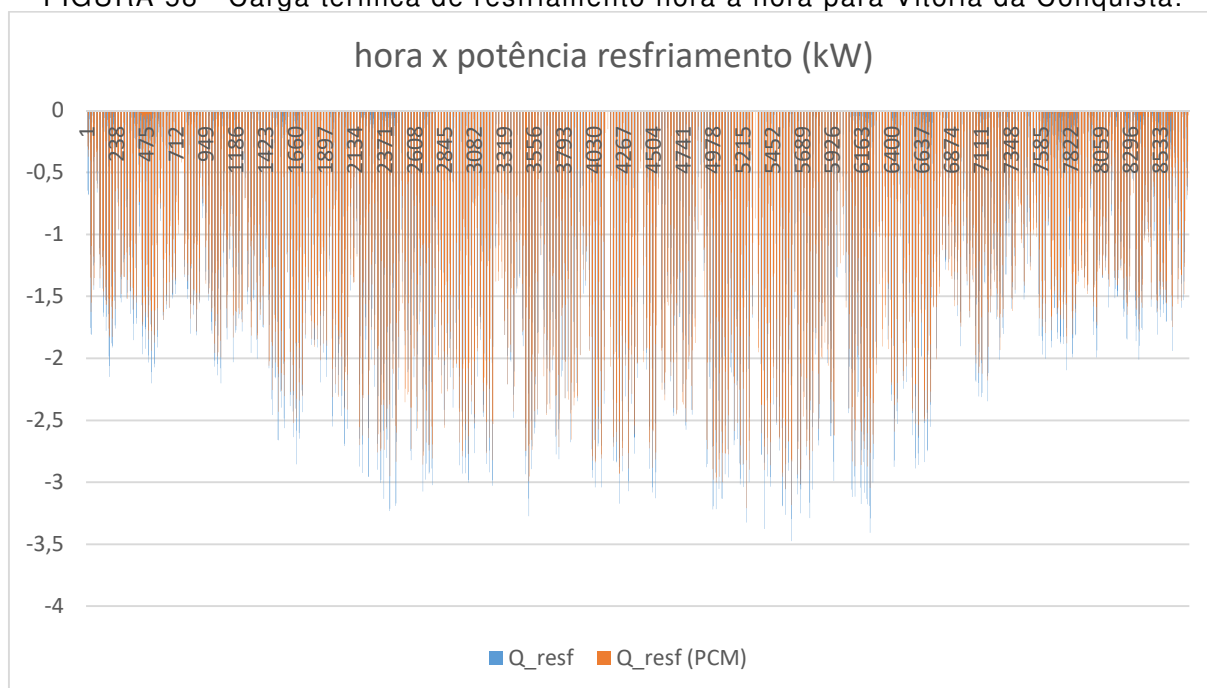
FIGURA 57 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Campo Grande no mês de julho.



Fonte: O Autor.

A FIGURA 58 apresenta um gráfico com a potência térmica necessária para o resfriamento no ambiente construído estudado durante todas as horas do ano. Para esta cidade fica perceptível uma diferença entre a potência necessária do caso de referência para o caso com PCM na parede externa.

FIGURA 58 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Vitória da Conquista.



Fonte: O Autor.

O consumo de energia térmica para aquecimento, existente no caso de referência, é zerado quando utilizado material com mudança de fase no modelo. Já para resfriamento foi calculado 131,33kWh/m<sup>2</sup>ano de energia térmica quando não utilizado material com mudança de fase e 117,85kWh/m<sup>2</sup>ano quando o material foi implantado a envoltória da edificação, causando uma redução de 10,28% no total de energia térmica. Essa redução passa a 13,04% quando considerado o segundo cenário de cálculo.

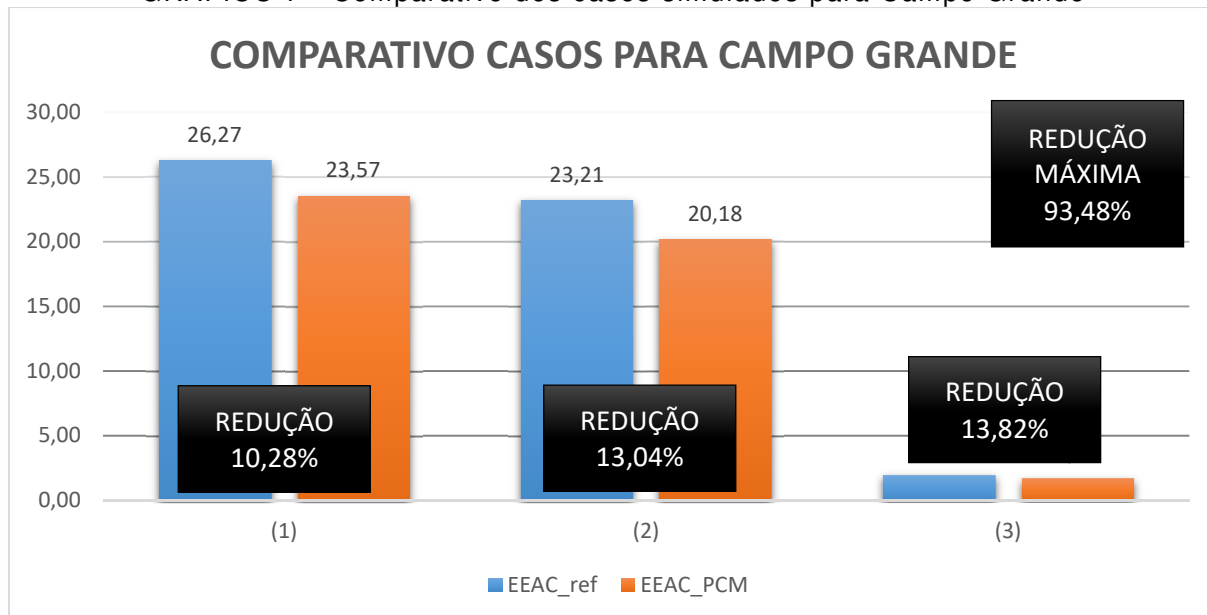
TABELA 13 - Resumo do consumo energético dos cenários simulados para Campo Grande.

Cenário	$\tilde{Q}_{AQ}$	$\tilde{Q}_{RESF}$	$\bar{W}_{VENT}$	$EEAC$
	$\tilde{Q}_{AQ,min}$	$\tilde{Q}_{RESF,min}$		$EEAC_{min}$
				$EEAC_{min,theorico}$
	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)	(kWh/m <sup>2</sup> .ano)		(kWh/m <sup>2</sup> .ano)
EEBA_ref	0,02	131,33	20,91	26,27
	0,02	116,02		23,21
				1,99
EEBA_PCM_10cm	0,00	117,85	20,91	23,57
	0,00	100,91		20,18
				1,71

Fonte: O Autor.

O GRAFICO 7 apresenta um comparativo visual dos resultados de consumo de energia elétrica para a cidade de Campo Grande.

GRÁFICO 7 - Comparativo dos casos simulados para Campo Grande



Fonte: O Autor.

Apesar dos resultados individuais de cada cenário terem apresentado reduções mais significativas se comparadas às outras cidades até este ponto descritas, a redução potencial máxima, explicitada pela última estratégia, com a utilização de material com mudança de fase foi de 93,48% para manutenção da faixa de temperatura de conforto térmico, resultado com potencial inferior a outras cidades.

A TABELA 14 apresenta os estudos sobre a exergia disponível para a cidade de Campo Grande. Pela simulação obteve-se uma quantidade de exergia de 291,7614kWh/m²ano, gerando frações de exergia que variam de 65,71% a 92,80%, COP de 1 e 5 respectivamente.

TABELA 14 – Frações de Exergia para Campo Grande.

	EXERGIA ANUAL RADIAÇÃO SOLAR (kWh/m².ano)	FRAÇÃO DE EXERGIA RECEBIDA (%)				
		$\frac{Ex_{\dot{Q}_{sun}}}{Ex_{\dot{Q}_{sun}} +  \dot{W}_{vent}  +  \dot{W}_{HP} }$				
		COP				
REFERÊNCIA	291,7614	1	2	3	4	5
		65,71%	77,11%	81,85%	84,44%	86,08%
		68,05%	78,71%	83,04%	85,39%	86,86%
PCM 10cm	291,7405	90,44%	91,85%	92,33%	92,58%	92,72%
		67,77%	78,51%	82,90%	85,28%	86,77%
		70,54%	80,34%	84,25%	86,34%	87,65%
		90,82%	92,05%	92,47%	92,68%	92,80%

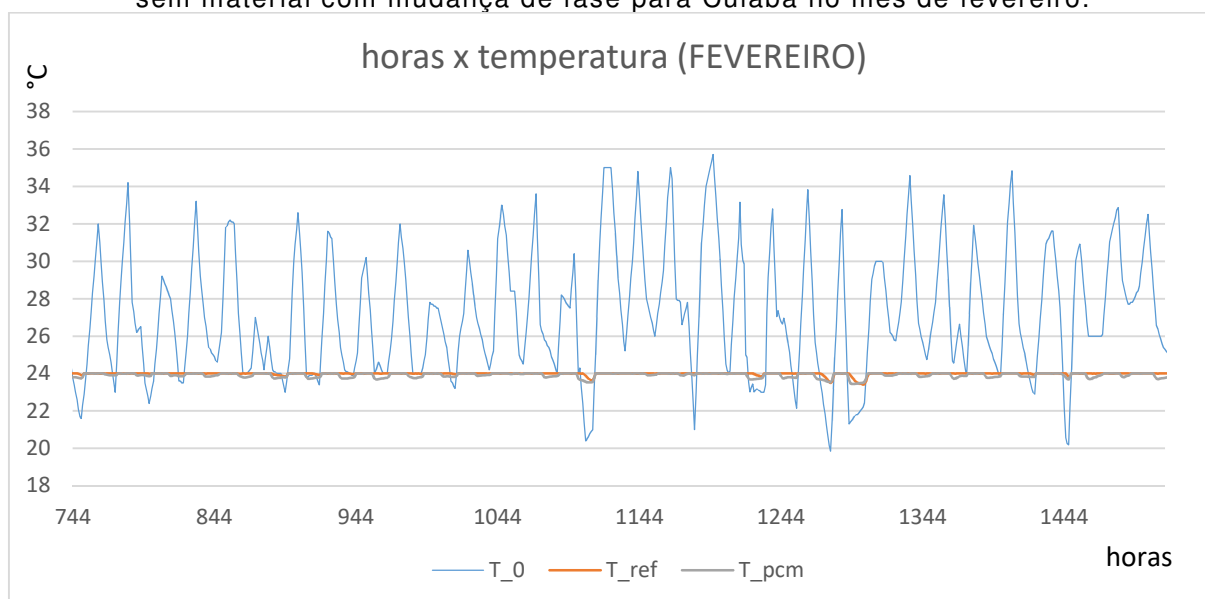
Fonte: O Autor.

## 7.7 CUIABÁ (ZONA BIOCLIMÁTICA 7)

A próxima cidade a ser simulada foi Cuiabá no estado do Mato Grosso. O início das simulações, assim como nas outras cidades, foi a definição da espessura mínima do material com mudança de fase para utilização do total potencial de armazenamento de energia durante a liquefação do material. Essa etapa gerou um resultado de 35cm de espessura que, se comparado com a parede de referência (15cm) significa mais do que o dobro de espessura apenas para o PCM.

As simulações então foram feitas com a espessura determinada. A FIGURA 59 apresenta o comparativo hora a hora das temperaturas para o mês de fevereiro. As temperaturas internas em ambos os casos ficam muito próximas da máxima temperatura de conforto térmico durante todas as horas do mês de verão estudado.

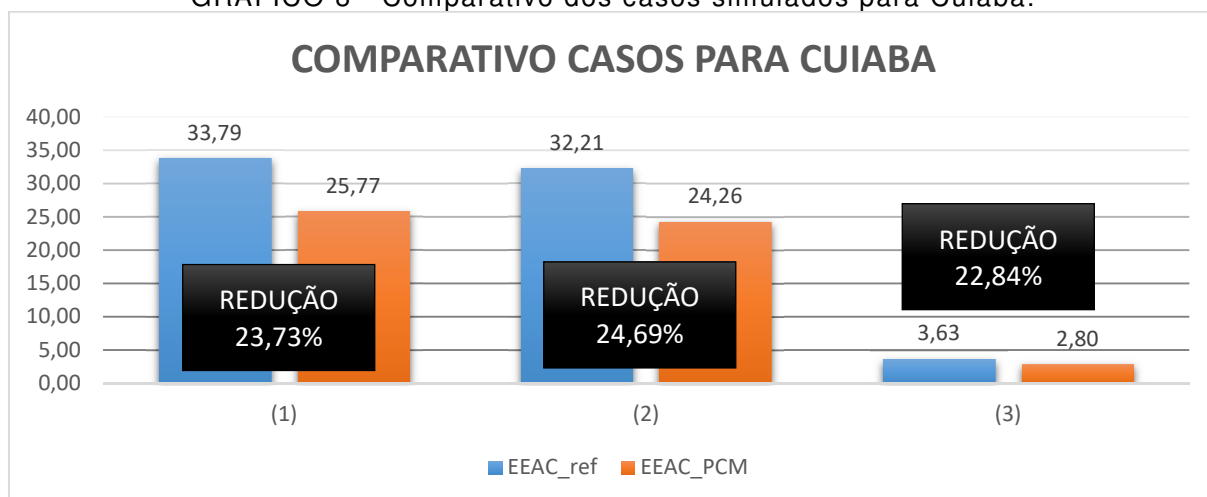
FIGURA 59 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Cuiabá no mês de fevereiro.



Fonte: O Autor.

O efeito dessas temperaturas internas reflete-se no consumo energético necessário para manutenção do conforto térmico. Para a cidade de Cuiabá foi verificada a necessidade de 33,79kWh/(m<sup>2</sup>·ano) de energia elétrica para o condicionamento de ar no caso de referência, enquanto com o uso de PCM esse valor é de 25,77kWh/(m<sup>2</sup>·ano) (GRÁFICO 8). Essa redução representa 23,73% a menos de consumo energético. Porém, o fato de serem necessários 35cm de material com mudança de fase, torna essa alternativa muito menos favorável a sua utilização, haja visto o custo e o aumento considerável na espessura da envoltória da edificação.

GRÁFICO 8 - Comparativo dos casos simulados para Cuiabá.



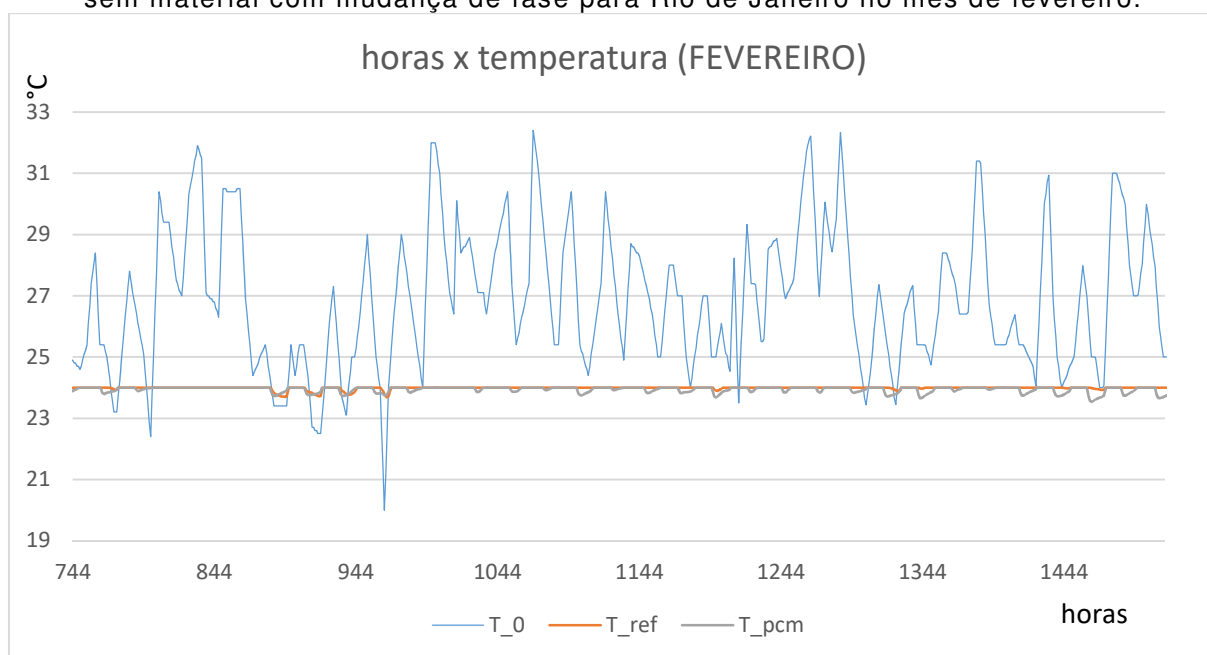
Fonte: O Autor.

## 7.8 RIO DE JANEIRO (ZONA BIOCLIMÁTICA 8)

A última cidade a ser simulada, representando a Zona Bioclimática 8 do Brasil, foi o Rio de Janeiro. Assim como em Campo Grande, foram necessários 10 centímetros de material com mudança de fase na parede externa para que o potencial máximo de armazenamento de energia fosse aproveitado.

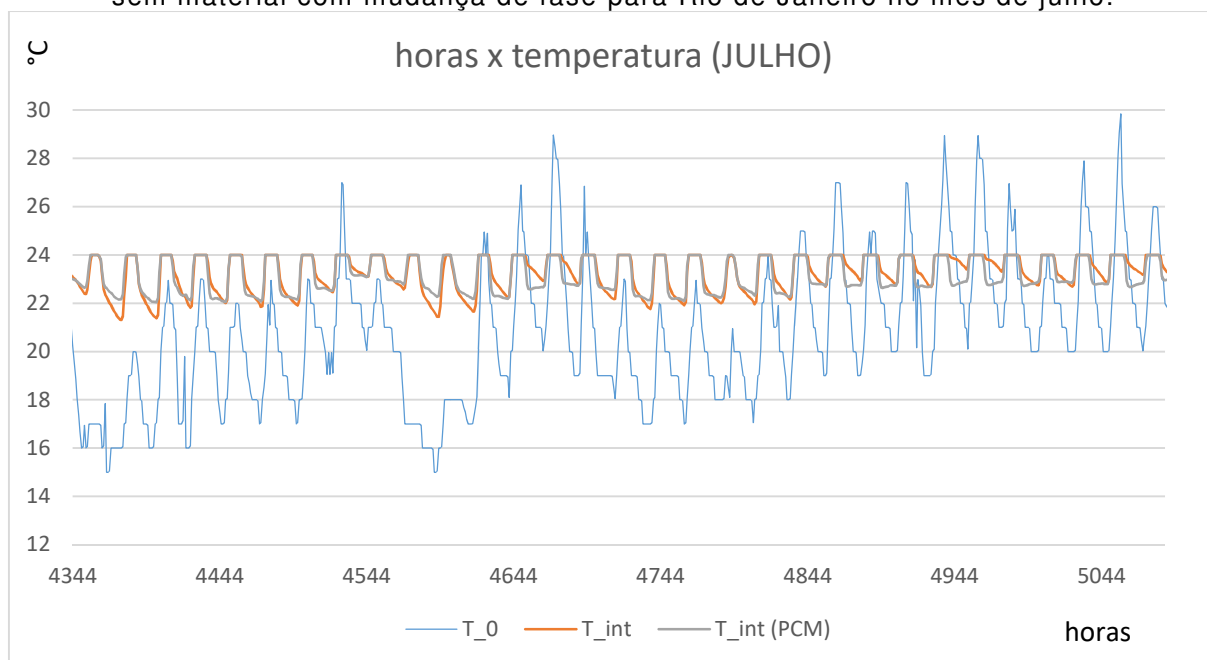
Definindo-se a espessura iniciaram-se as simulações dos 2 casos de estudos. As FIGURAS 60 e 61 apresentam hora a hora as temperaturas internas e externas para o 2 casos nos meses de fevereiro e julho.

FIGURA 60 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Rio de Janeiro no mês de fevereiro.



Fonte: O Autor.

FIGURA 61 - Comparativo hora a hora das temperaturas internas e externas, com e sem material com mudança de fase para Rio de Janeiro no mês de julho.

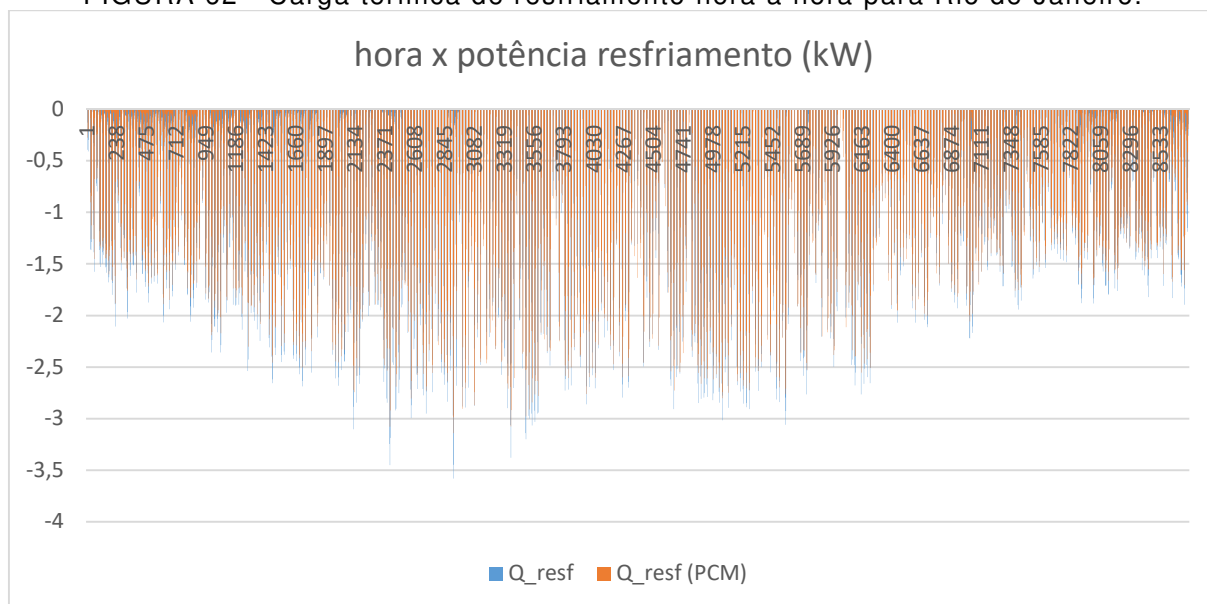


Fonte: O Autor.

As temperaturas internas nos meses de verão estudados ficam, assim como na simulação para Cuiabá, muito próximas em ambos os casos da temperatura máxima da faixa de conforto térmico, e no mês de julho não houve, aparentemente a necessidade de aquecimento.

A FIGURA 62 apresenta as cargas térmicas de resfriamento hora a hora para a cidade do Rio de Janeiro.

FIGURA 62 - Carga térmica de resfriamento hora a hora para Rio de Janeiro.



Fonte: O Autor.

As simulações de fato mostraram que não há necessidade de aquecimento para nenhum dos dois casos simulados em qualquer época do ano. Porém, para a manutenção do conforto térmico interno são necessários 123,12 kWh/(m²·ano) de carga térmica para resfriamento no caso de referência e 110,35 kWh/(m²·ano) quando implantado o PCM na parede externa. Esses valores se reverterem em 24,62kWh/(m²·ano) de energia elétrica e 22,07 kWh/(m²·ano) (TABELA 15).

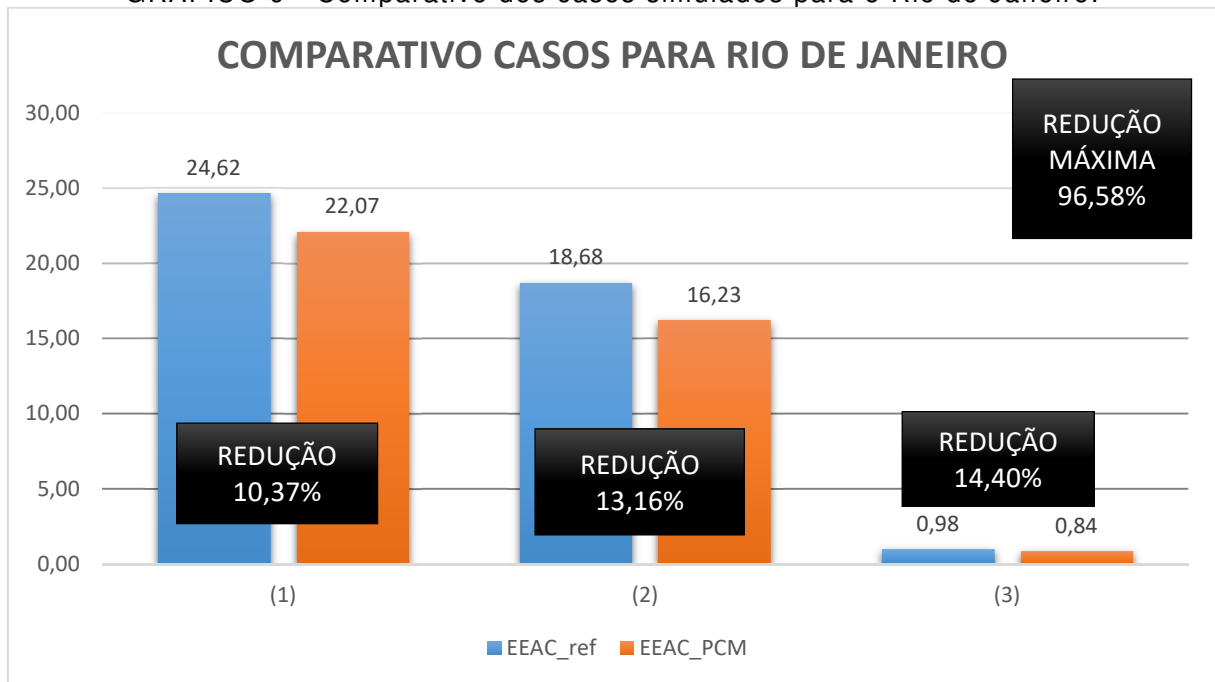
TABELA 15 - Resumo do consumo energético dos cenários simulados para o Rio de Janeiro.

Cenário	$\tilde{Q}_{AQ}$	$\tilde{Q}_{RESF}$	$\bar{W}_{VENT}$	$EEAC$
	$\tilde{Q}_{AQ,min}$	$\tilde{Q}_{RESF,min}$		$EEAC_{min}$
				$EEAC_{min,teorico}$
	(kWh/m².ano)	(kWh/m².ano)		(kWh/m².ano)
EEBA_ref	0,00	123,12	20,92	24,62
	0,00	93,42		18,68
				0,98
EEBA_PCM_10cm	0,00	110,35	20,92	22,07
	0,00	81,13		16,23
				0,84

Fonte: O Autor.

Ficam claras as reduções quando analisado o GRÁFICO 9. Apenas no cenário 1 é possível verificar uma redução de 10,37% no consumo de energia elétrica. Quando implantada a ventilação inteligente (cenário 2) há um potencial de redução de 13,16%. Quando analisado o cenário 3 a redução, apenas pela utilização do material com mudança de fase, é de 14,40%. Juntando o potencial máximo é de 96,58% de redução do consumo energético considerando a utilização de PCM, ventilação inteligente e um sistema de condicionamento de ar otimizado.

GRÁFICO 9 - Comparativo dos casos simulados para o Rio de Janeiro.



Fonte: O Autor.

A quantidade de exergia anual de radiação solar calculada pela simulação é de 279,9123kWh/m²ano, e representa entre 66,02% e 92,79% de toda a exergia no ambiente construído (TABELA 16).

TABELA 16 – Frações de exergia para o Rio de Janeiro.

	EXERGIA ANUAL RADIAÇÃO SOLAR (kWh/m².ano)	FRAÇÃO DE EXERGIA RECEBIDA (%)				
		$\frac{Ex_{\dot{Q}_{sun}}}{Ex_{\dot{Q}_{sun}} +  \dot{W}_{vent}  +  \dot{W}_{HP} }$				
		COP				
		1	2	3	4	5
REFERÊNCIA	279,9123	66,02%	77,24%	81,88%	84,41%	86,01%
		71,00%	80,54%	84,32%	86,34%	87,61%
		91,55%	92,29%	92,54%	92,67%	92,74%
PCM 10cm	279,8943	68,07%	78,63%	82,91%	85,23%	86,69%
		73,28%	81,99%	85,37%	87,17%	88,28%
		91,76%	92,40%	92,61%	92,72%	92,79%

Fonte: O Autor.

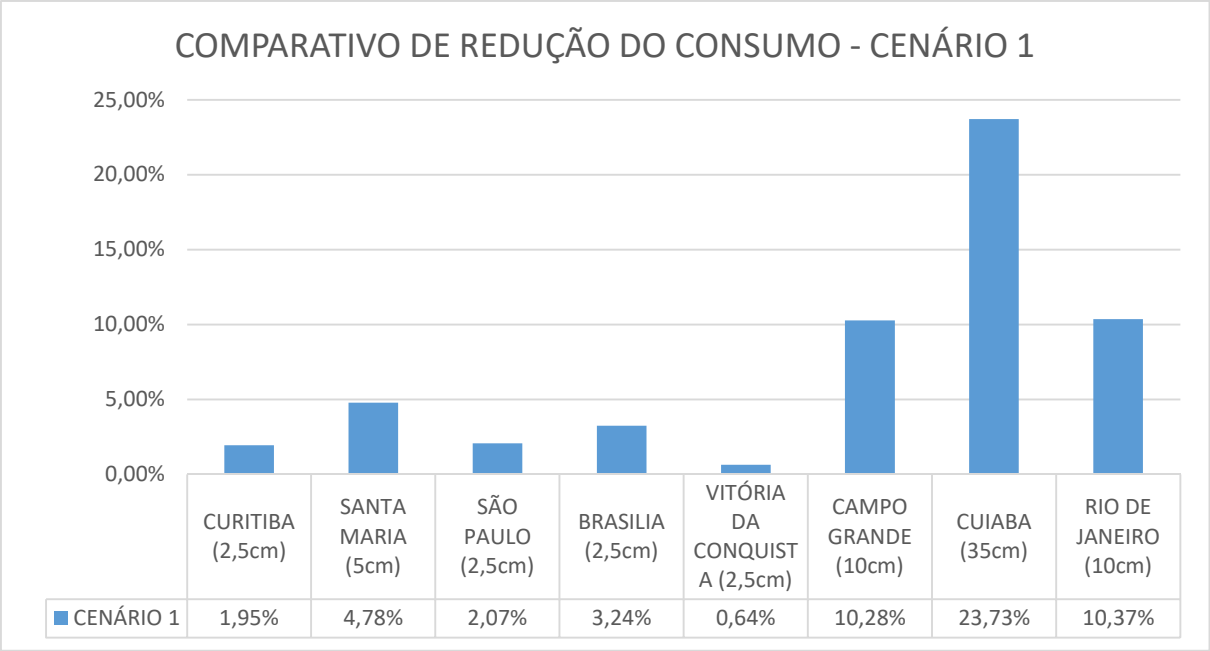
## 7.9 RESUMO DOS RESULTADOS

Para melhor visualização do impacto da utilização de material PCM na vedação externa do volume de controle simulado em todas as cidades nesta dissertação apresentadas, foram criados gráficos para cada um dos três cenários.



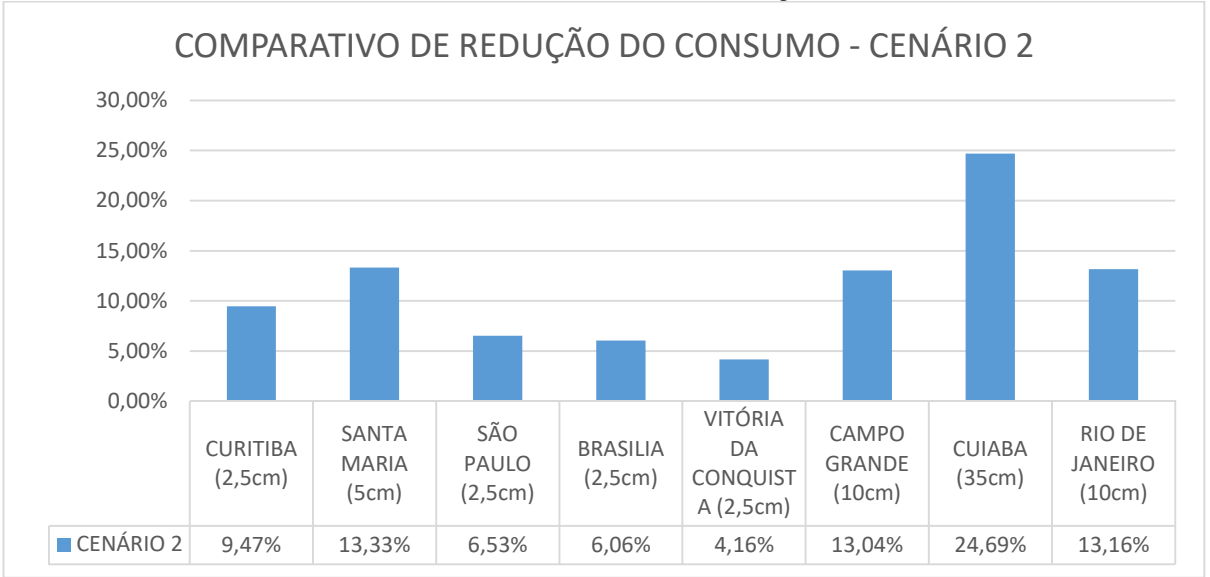
Sendo eles, cenário 1 (GRÁFICO 10) sistema com condicionamento de ar sem otimização, cenário 2 (GRÁFICO 11) ventilação no auxílio ao condicionamento de ar e cenário 3 (GRÁFICO 12) sistema de condicionamento de ar otimizado e ventilação quando possível.

GRÁFICO 10 – Comparativo de reduções de consumo de energia elétrica para cada cidade simulada, com método de cálculo segundo o cenário 1.



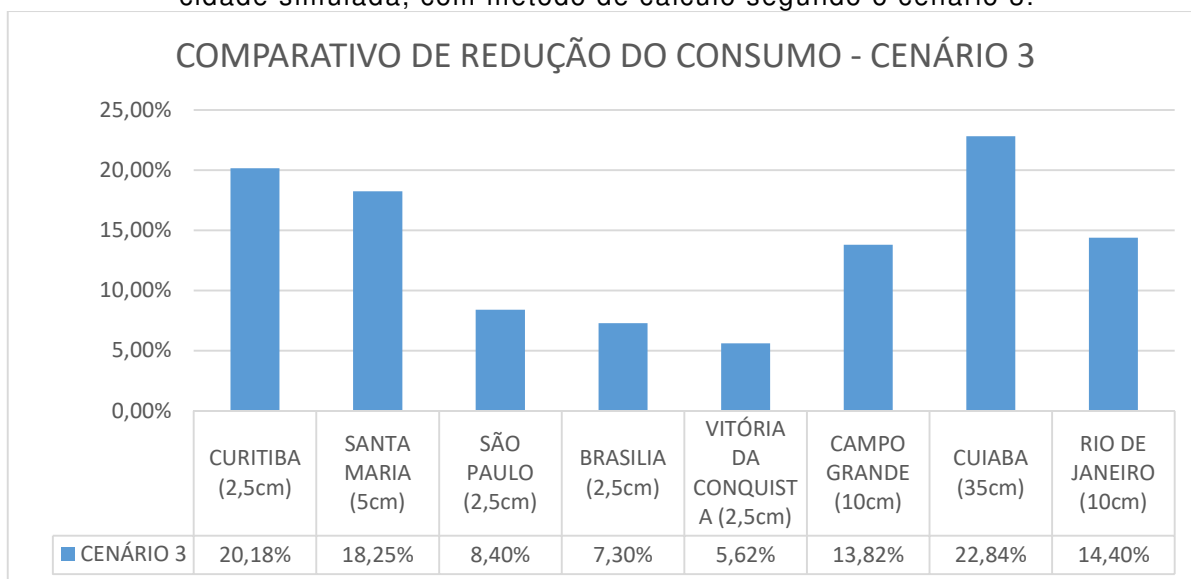
Fonte: O Autor.

GRÁFICO 11 - Comparativo de reduções de consumo de energia elétrica para cada cidade simulada, com método de cálculo segundo o cenário 2.



Fonte: O Autor.

GRÁFICO 12 - Comparativo de reduções de consumo de energia elétrica para cada cidade simulada, com método de cálculo segundo o cenário 3.



Fonte: O Autor.

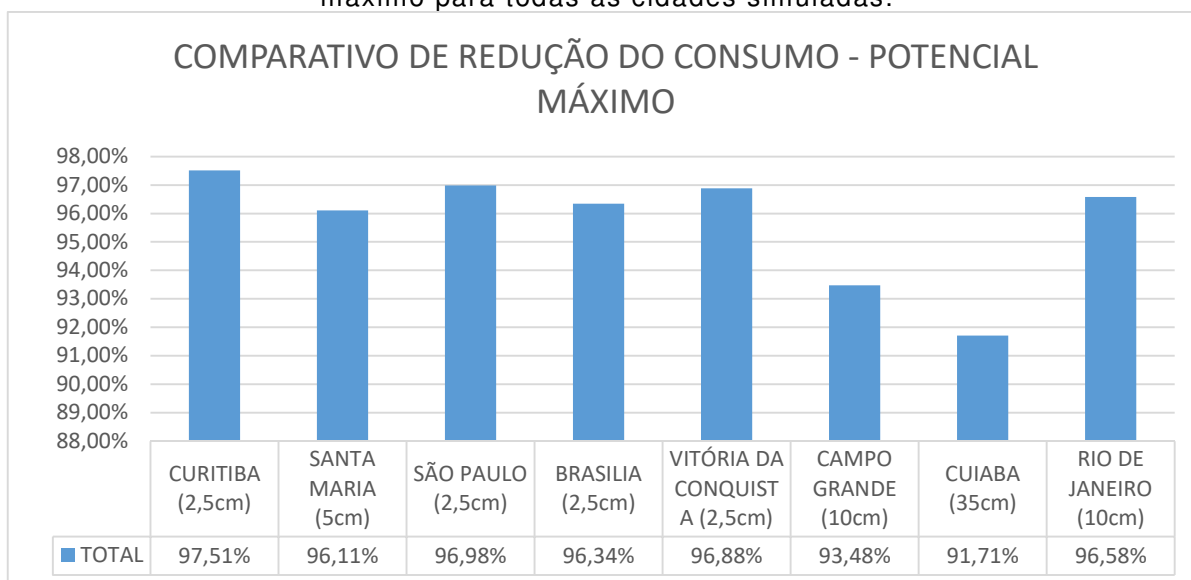
Nota-se claramente que Cuiabá apresenta a maior redução do consumo de energia elétrica, porém deve-se ficar claro que a espessura mínima para que não houvesse a total liquefação do PCM foi de 35cm, o que é uma quantidade de material considerável, haja visto que lidamos nesta pesquisa com placas de 0,5cm de espessura. As espessuras simuladas, 2,5cm, 5cm, 10cm e 35cm aparentemente criam grupos que têm para todas as cidades a mesma faixa de redução consumo de energia para o cenário 1.

No cenário 2, a utilização de PCM quando há ventilação possui maior possibilidade de redução da quantidade de energia necessária para manutenção da faixa de temperatura de conforto térmico. Todas as cidades, exceto Cuiabá, apresentaram uma melhora nos resultados com a ventilação auxiliando o condicionamento de ar. Essa estratégia de controle de temperatura permitiu uma redução extra de 8% aproximadamente para a cidade de Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul.

No último cenário, a utilização de um sistema de condicionamento de ar otimizado em seu limite, possibilita o maior potencial do material com mudança de fase. As melhorias se deram principalmente nas cidades mais frias simuladas, Curitiba e Santa Maria, com espessuras de PCM de 2,5cm e 5cm respectivamente, onde as reduções do consumo de energia pelo impacto do uso do material estudado ficaram entre 18,25% e 20,18%.

Também foi criado um gráfico da mesma forma que os anteriores de maneira a deixar claro o máximo potencial de redução do consumo energético, considerando a utilização de material com mudança de fase, juntamente com a ventilação, quando favorável, e a utilização de condicionamento de ar otimizado (GRÁFICO 13).

GRÁFICO 13 - Comparativo de reduções de consumo de energia elétrica potencial máximo para todas as cidades simuladas.



Fonte: O Autor.

O potencial total de redução do consumo de energia elétrica simulado, apresentado no último gráfico, mostra resultados que demonstram na teoria, o impacto do uso de sistemas de condicionamento de ar mais otimizados juntamente com materiais de mudança de fase. O menor valor é de 91,71% para Cuiabá e 97,51% para Curitiba como o maior potencial de redução do consumo de energia elétrica.

## 8. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho comprovam que os materiais com mudança de fase podem sim, em certas condições climáticas, reduzir o consumo de energia na manutenção do conforto térmico em ambientes construídos. Apesar disto, com base nos mesmos resultados, determinados para as oito zonas bioclimáticas definidas de acordo com a norma brasileira NBR 15.220, e como já observado na pesquisa bibliografia inicial, entende-se que não se pode tirar conclusões de maneira generalizada sobre o impacto da utilização de materiais com mudança de fase na redução do consumo de energia para manutenção do conforto térmico em ambientes construídos.

Considerando os sistemas atuais de condicionamento de ar, a redução chegou a 4,28% para a cidade de Santa Maria e aproximadamente 10% para Campo Grande e Rio de Janeiro. Adicionada a possibilidade de ventilação quando a diferença entre temperatura interna e externa é favorável, os resultados foram ainda melhores. Na cidade de Curitiba a utilização de PCM contribuiu para uma redução de 9,47%, enquanto em Santa Maria o potencial de redução do consumo energético passou de 13%. Aproximadamente o mesmo valor foi calculado também para Rio de Janeiro e Campo Grande. Quando considerado o cenário 3, as reduções do consumo foram mais expressivas. A cidade de Curitiba obteve os melhores resultados com 20% de possível economia.

Considerando o emprego de sistemas inteligentes, que possibilitem a troca de calor com o exterior, juntamente com a mínima necessidade de condicionamento de ar gerou valores significativos quanto à possibilidade de redução do consumo atual de energia. Os valores chegaram a mais de 90% de redução do consumo total de energia elétrica para manutenção do conforto térmico interno para o modelo físico estudado. Existe, sem dúvida, um claro potencial de redução do consumo energético, como indicam os resultados deste estudo, mas cujo aproveitamento depende do desenvolvimento tecnológico.

Para as cidades de Cuiabá, Campo Grande e Rio de Janeiro, o material com mudança de fase considerado levou a uma espessura de mais de 10 cm. Novos estudos devem ser realizados com diferentes temperaturas de fusão para buscar melhores resultados para essas cidades.

## 8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as delimitações deste trabalho, a escala do modelo físico simulado e as diferenças climáticas de um país como o Brasil, seguem algumas considerações e sugestões para trabalhos futuros:

- Análise da variação da temperatura de fusão do material PCM;
- Análise de diferentes tipos de PCM;
- Aplicação de PCM em edificações com usos diferentes do dessa pesquisa;
- Ventilação interna à parede para facilitar o resfriamento do PCM.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. **Solar Energy**, v. 30, n. 4, p. 313–332, 1983.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.401**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.
- ALI, S. Phase change materials integrated in building walls : A state of the art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 870–906, 2014.
- ALVES, A. B. M. **Potencial de climatização por dutos subterrâneos segundo zona bioclimática, profundidade e tratamento da superfície do solo**. 122f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Ashrae handbook fundamentals**. EUA: Ashrae Standards, 2009.
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Ashrae Standard 55** - Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 1992.
- BASF. **BASF MICRONAL**. Disponível em: <[https://www.basf.com/images/corp/news-media/science-around-us/wax-in-the-wall-for-a-pleasant-indoor-climate/micronal\\_small\\_4-3.jpg](https://www.basf.com/images/corp/news-media/science-around-us/wax-in-the-wall-for-a-pleasant-indoor-climate/micronal_small_4-3.jpg)>. Acesso em: 15 set 2016.
- BODACH, S.; HAMHABER, J. Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. **Energy Policy**, v. 38, n. 12, p. 7898–7910, 2010.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional: ano base 2016 - Final**. Brasília, 2016.
- CABEZA, L. F. et al. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 2, p. 113–119, fev. 2007.
- DAVID, D.; JOHANNES, K.; ROUX, J. A review on phase change materials integrated in building walls. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 379–391, 2011.
- DE GRACIA, A. et al. Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1517–1523, 2010.
- DE GRACIA, A. et al. A simple model to predict the thermal performance of a ventilated facade with phase change materials. **Energy and Buildings**, v. 93, p. 137–142, 2015.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009. 187 p. (Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Demanda de Energia 2050**. Rio de Janeiro, 2014. 245f. Nota técnica.

FIORITO, F. Phase-change Materials for Indoor Comfort Improvement in Lightweight Buildings. A Parametric Analysis for Australian Climates. **Energy Procedia**, v. 57, n. 0, p. 2014–2022, 2014.

GLASSX. **GlassX PCM**. Disponível em: <[http://glassx.ch/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/GLASSX\\_crystallisation\\_process\\_02.jpg](http://glassx.ch/fileadmin/_migrated/content_uploads/GLASSX_crystallisation_process_02.jpg)>. Acesso em: 6 maio 2015.

HABIB, R. C. M. M. **Tempo de retorno energético de isolantes térmicos na climatização de edificações: estudo de caso da lã de rocha na zona bioclimática 1 do Brasil**. 107f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

HALFORD, C. K.; BOEHM, R. F. Modeling of phase change material peak load shifting. **Energy and Buildings**, v. 39, p. 298–305, 2007.

HAUSLADEN, G. **Climate Design: Solutions for Buildings that Can Do More with Less Technology**. 200f. Birkhäuser, 2005.

HUANG, M. J.; EAMES, P. C.; HEWITT, N. J. The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 90, n. 13, p. 1951–1960, 2006.

HUANG, M. J.; EAMES, P. C.; NORTON, B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, n. 12–13, p. 2715–2733, 2004.

IZQUIERDO-BARRIENTOS, M. A. et al. A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM). **Applied Thermal Engineering**, v. 47, p. 73–85, dez. 2012.

JEONG, S. G. et al. Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 117, p. 87–92, 2013.

KALNÆS, S. E.; JELLE, B. P. Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities. **Energy and Buildings**, v. 94, n. 7491, p. 150–176, 2015.

KONG, X. et al. Experimental research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage. **Energy and Buildings**, v. 62, p. 597–604, 2013.

KOSNY, J. et al. Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs). **Energy and Buildings**, v. 52, p. 122–131, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW, 1997. 188 p. il.

LEE, K. O. et al. Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management. **Applied Energy**, v. 137, p. 699–706, 2015.

MANDILARAS, I. et al. Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. **Building and Environment**, v. 61, p. 93–103, 2013.

MAZZAROTTO, A. C. E. K. **Uso do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios em Curitiba: Verificação computacional de desempenho comparativo com soluções convencionais**. 263f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014

PASUPATHY, A.; VELRAJ, R.; SEENIRAJ, R. V. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, p. 39–64, 2008.

PEREIRA, C. D.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. **Nota técnica referente aos níveis mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar no Brasil**. 2013.

PHASE CHANGE ENERGY SOLUTIONS. **ENRG BLANKET**. Disponível em: <<http://www.phasechange.com/biopcmat/>>. Acesso em: 16 ago 2015.

ROBSON, C. **Real World Research: a resource for social scientists and practioner-researchers**. 2.ed. Oxford: Blackwell, 2002.

RORIZ, M. **Arquivos climáticos de municípios brasileiros. ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**. São Carlos - SP. Janeiro de 2012a.

SAJJADIAN, S. M.; LEWIS, J.; SHARPLES, S. The potential of phase change materials to reduce domestic cooling energy loads for current and future UK climates. **Energy and Buildings**, v. 93, p. 83–89, 2015.

SCHOSSIG, P. et al. Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 89, n. 2–3, p. 297–306, 2005.



SILVA, T. et al. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 235–245, 2012.

SOARES, N. et al. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 411–421, 2014.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus. Energy Simulation Software**, 2016. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>

UNEP. **Buildings - Investing in Energy and Resource Efficiency**. [s.l: s.n.].

WANG, Q.; ZHAO, C. Y. Parametric investigations of using a PCM curtain for energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 33–42, 2015.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos** / Robert K. Yin; trad. Daniel Grassi. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.